



Editorial IAI

Prof. **Edgar Serna M.** (Ed.)

DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA

Quinta Edición

Medellín - Antioquia
2020

Prof. **Edgar Serna M.** (Ed.)

Desarrollo e Innovación en Ingeniería

Quinta Edición

ISBN: 978-958-52333-4-8

© 2020 Editorial Instituto Antioqueño de Investigación



Desarrollo e innovación en ingeniería [recurso electrónico] / Edgar Serna M.,
Ed. -- 5a. ed. -- Medellín: Instituto Antioqueño de Investigación, 2020.
Archivo en formato pdf (25 Mb). -- (Ingeniería y ciencia)

Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-958-52333-4-8

1. Ingeniería - Innovaciones tecnológicas - Investigaciones
2. Investigación industrial I. Serna M., Edgar, ed. II. Serie

CDD: 620 ed. 23

CO-BoBN- a10574900

Investigación Científica

ISBN: 978-958-52333-4-8

DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.4031208>

Desarrollo e Innovación en Ingeniería

Serie: Ingeniería y Ciencia

© Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Quinta Edición: septiembre 2020

ISBN: 978-958-52333-4-8

Publicación electrónica gratuita

Hecho el Depósito Legal Digital

Copyright © 2020 Instituto Antioqueño de Investigación IAI™. Salvo que se indique lo contrario, el contenido y distribución de esta publicación está autorizado bajo [Creative Commons Licence CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Edición general: Instituto Antioqueño de Investigación IAI

Diseño: IAI, Medellín, Antioquia.

Editorial Instituto Antioqueño de Investigación es Marca Registrada del *Instituto Antioqueño de Investigación*. El resto de marcas registradas pertenecen a sus respectivos propietarios.

La información, hallazgos, puntos de vista y opiniones contenidos en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Instituto Antioqueño de Investigación IAI, y no se garantiza la exactitud de la información proporcionada en este documento.

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

[editorial\(AT\)fundacioniai.org](mailto:editorial(AT)fundacioniai.org)

Instituto Antioqueño de Investigación IAI

<http://fundacioniai.org>

[contacto\(AT\)fundacioniai.org](mailto:contacto(AT)fundacioniai.org)

Contenido

	Pág.
Presentación	1
<i>Caracterización y cuantificación de microplásticos en los sedimentos y la columna de agua del río Magdalena en la ciudad de Neiva, Colombia</i>	2
Heidy Calderón Quimbaya, Paula Martínez Silva, Jorge Leonardo Muñoz Yustres	
<i>Aplicación del Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares IVE en la estimación de las emisiones contaminantes provenientes de fuentes móviles</i>	8
Nilda Hilario Román, Hernán Baltazar Castañeda, Walter Pardavé Livia	
<i>Análisis al índice de riesgo generado en los humanos por la ingesta diaria de fluoruro</i>	14
Luis Carlos Losada Benavides, Kelly Johana Meléndez Segura, Ángela Goretty García Gómez, Jorge Bernardo Ramírez Zarta	
<i>Una mirada a las tecnologías emergentes para mitigar los efectos del cambio climático en la agricultura</i>	22
Ricardo Andrés Fonseca Perdomo, Daniel Felipe Peñarete Moreno, Julio Faenz Ruiz González	
<i>Proceso para la elaboración de un aglomerado a base de madera de café</i>	33
Néstor Ricardo Mejía Nariño, Pablo Valencia Osorio	
<i>Diseño y desarrollo de un prototipo para la medición de material particulado PM_{2.5} utilizando herramientas IoT</i>	37
Ángel Alejandro Rodríguez Aya, John Alejandro Figueredo Luna, Juan Alejandro Chica García, Carlos Ariel Beltrán Enciso, María del Pilar Wilches	
<i>Modelo de toma de decisiones para la evaluación de la contribución a la sostenibilidad social de las mezclas asfálticas</i>	47
Verena Maldonado Flores, Leonardo Andrés Sierra Varela	
<i>Caracterización numérica y experimental de edificaciones construidas mediante el sistema túnel</i>	56
Carlos Felipe Orduz Suárez, William Valencia-Mina, Álvaro Viviescas Jaimes, Édison Osorio Bustamante	
<i>Construcción ancestral y concepción mística de los Putucos del altiplano peruano</i>	65
Yasmani Teófilo Vitulas Quille, Karina Betzabeth Reynoso Machaca	
<i>Análisis a la auto-urbanización generada por el Parque Explora como patrón de auto-organización urbana en la ciudad de Medellín, Colombia</i>	74
Javier Enrique Rivero Jerez, Carlos Alberto Palacio Tobón	
<i>Propuesta e implementación de un Building Information Modeling BIM Room</i>	86
Oscar Fernando Rosas Crespo	
<i>Ingeniería del software y desarrollo sostenible: Un análisis bibliométrico</i>	95
Luisa María Jiménez Ramos, Nixon Duarte Acosta, Juan Pablo Vélez Uribe, Juan Pablo Berrio López	
<i>Sistema de gestión de captación de agua de lluvia para descarga de sanitarios: Estudio de Mapeo Sistemático</i>	105
Leandro Martín Crespi, Cristian Schiffino, Iris Inés Sattolo, Marisa Daniela Panizzi	

<i>Estrategias de priorización de requisitos no-funcionales en desarrollos ágiles de software: Un diagnóstico inicial</i>	118
Julio Lopera, Sebastián Espinosa, Viviana Díaz, Liliana González-Palacio, María Clara Gómez-Álvarez	
<i>Panorama del uso de datos enlazados en abierto en la academia: Una revisión</i>	127
Cecilia Ávila-Garzón, Paula Rodríguez-Marín, Jorge Bacca-Acosta, Jhosep García-Aldana	
<i>Una visión de la tecnología para la Gestión del Conocimiento: Resultados en la literatura latinoamericana</i>	135
Luciano Nicolás Straccia, Cecilia Ramacciotti, María Florencia Pollo-Cattaneo	
<i>Proyectos de aula en Ingeniería del Software con alianzas Industria-Universidad bajo enfoques ágiles: Un diagnóstico inicial</i>	143
Jair Reinaldo Camacho-Serrano, Sara Marcela Pavas Madrid, Liliana González-Palacio, María Clara Gómez-Álvarez	
<i>Estimación y priorización de requisitos no-funcionales para desarrollo de software: Estado del arte</i>	150
María José Salamea, Liliana González-Palacio, Marc Oriol, Carles Farré	
<i>Evaluación de calidad para la fase de diseño de aplicaciones web a partir de un modelo basado en la norma ISO/IEC 9126</i>	158
Katerine Beleño Caselles, John Timy López Gómez, Miguel Alberto Pinzón Rincón	
<i>Modelos de aprendizaje de máquina para el control predictivo de la calidad de cemento</i>	171
William Diaz Córdoba, Laura Lotero Vélez	
<i>Diseño de una plataforma de E-commerce para el sector de alimentos</i>	180
Edwin Barrientos Avendaño, Miguel Alberto Rincón Pinzón	
<i>Análisis al funcionamiento de arquitecturas x86 y Advanced RISC Machine ARM en el procesamiento de archivos distribuidos de gran volumen</i>	187
Rodolfo Sánchez García, Juan C. García-Ojeda	
<i>Análisis de los requerimientos en habilidades de la industria del software para gerentes de proyectos en entornos ágiles</i>	192
Sebastián López	
<i>Identificación y análisis a los avances de la investigación relacionada con el gobierno de TI en PYMES: Una revisión</i>	201
Yeni Paola Trujillo-Lambert, Gina Maestre-Góngora, Mariutsi Alexandra Osorio-Sanabria	
<i>Estudio de la co-creación y la participación ciudadana en las plataformas emergentes para diseñar soluciones de innovación ante los retos de la pandemia Covid-19</i>	211
Lizeth Fernanda Serrano Cárdenas, Yessika Lorena Vásquez González, Laura Victoria Buitrago Álvarez, Hugo Fernando Castro Silva	
<i>Efecto de los campos magnéticos y eléctricos sobre la membrana plasmática de las células individuales: Un enfoque computacional</i>	222
Juan Felipe Escobar H., Juan Jairo Vaca-González, Johana María Guevara, Diego Alexander Garzón-Alvarado	

<i>Simulación de radio propagación de arreglos de Múltiples-Entradas-Múltiples-Salidas (MIMO) en frecuencias de ondas milimétricas para redes 5G</i>	233
Javier Enrique Arévalo Peña	
<i>Comparación del desempeño de un Controlador Adaptativo por Modelo de Referencia y un Controlador Proporcional, Integral y Derivativo PID clásico, en el control de un convertidor DC-DC reductor</i>	243
Martín Medina-Sánchez, Marjorie Naranjo, Jesús Rodríguez-Flores	
<i>Diseño y construcción de un prototipo de digestor para la producción de biogás metano como recurso energético</i>	255
Pedro Luis Muñoz Ochoa, Alixdey Andrea Gutiérrez Cárdenas, Diana Del Pilar Atehortúa Amaya	
<i>Aplicación de la electromiografía superficial de alta densidad en un estudio preliminar en pacientes con neuropatía</i>	263
Carlos Arturo Carrasco Henao	
<i>Diseño de un nebulizador portátil ultrasónico para el uso en pacientes con enfermedades respiratorias</i>	273
Ivette Pilarte Centeno, Harry Williams Pérez Cortez, Octavio Daniel Salgado Montoya	
<i>Análisis a las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT relacionadas con la propagación de ondas milimétricas que usa la herramienta Xirio online</i>	279
Guillermo Fernando Valencia Plata, Félix Roberto Gómez Devia, Edgar Fabián Rodríguez Veloza	
<i>Análisis a la implementación de comunicaciones utilizando tecnología Long Range LoRa</i>	295
Carlos Andrés Gómez Ruiz, Ramiro Osorio Díaz	
<i>Prototipo piloto de módulo eco-amigable para recarga de energía e interacción social</i>	304
Gustavo Meneses Benavides	
<i>Ilustración aplicativa del Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis – Matching SMAA-M en el sector salud</i>	313
Rafael Guillermo García Cáceres	
<i>Caracterización de métodos de evaluación ergonómica y antropométrica en trabajadores del sector metalmecánico</i>	320
Lyda Viviana Gómez Merchán, Diana Karina López Carreño, Leider Alexandra Vásquez Ochoa	
<i>Análisis a la productividad del sector metalmecánico en Colombia y Boyacá</i>	331
Nidia Stella Rincón Parra, Sonia Patricia Garzón Martínez	
<i>Aplicación de la metodología de modelado de procesos de negocio BPM en el análisis de desempeño de los servicios hospitalarios quirúrgicos</i>	339
Elisa del Carmen Navarro Romero, Óscar Mauricio Gelves Alarcón, Helien Parra Riveros	
<i>Comportamiento de los Sistemas de Información para la optimización de procesos en Instituciones de Educación Superior: Una revisión sistemática</i>	350
Lauren Yinett Gómez Quintero, Johana A. Manrique	
<i>Propuesta de un método para la optimización del proceso de fabricación de yogurt</i>	359
Cristian Xavier Espín Beltrán	

<i>Análisis a la utilización de la Industria 4.0 en Pequeñas y Medianas Empresas: Una revisión</i>	Mary Alejandra Mendoza Pérez, Flor Nancy Díaz-Piraquive, Yasser de Jesús Muriel-Perea	368
<i>Utilización del método Agente Viajero Múltiple MTSP como modelo para construir o planificar rutas de entrega de alimentos</i>	Denicce Licht Ardila, Ana Lucía Paque Salazar, Jorge Bernardo Ramírez Zarta	376
<i>Capacidades dinámicas en organizaciones de ingeniería química</i>	Juan Santiago Calle Piedrahita, Gloria María Isaza Zapata, Byron Enrique Portilla Rosero	385
<i>Diseño y optimización de un gráfico de control sintético bilateral para el control de la dispersión</i>	Gustavo Campos-Avenidaño	394
<i>IASO: Metodología para la definición y fortalecimiento de líneas de investigación</i>	Yuber Liliana Rodríguez-Rojas, Ana María Luque-Clavijo, Harold Hernández Cruz, Julián Andrés Riveros Clavijo	400
<i>Relación de la fuerza máxima de agarre y de pinza con la edad y el género en un grupo de trabajadores del sector industrial</i>	Magda Viviana Monroy Silva, Danna Alejandra Jiménez García, Christian Ricardo Zea Forero	412
<i>Implementación de la metodología de Diseño Centrado en las Personas DCP para la identificación de oportunidades de innovación en el sector agrícola</i>	Diana Katherine Parrado Hernández, Lizeth Fernanda Serrano Cárdenas, Hugo Fernando Castro Silva	422
<i>Percepción de la gestión del conocimiento en una facultad de ingeniería. Caso: Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia</i>	Javier Hernández Cáceres, Jonathan David Morales Méndez, Heidi Patricia Camacho Grass	435
<i>Análisis a las causas del ausentismo laboral asociadas a los procesos productivos de las Pymes en el sector textil-confección</i>	Claudia Ivonne Arámbula García, Manuel José Silva, Marieth María Perpiñán Araujo, Juan C. Acevedo-Páez	444
<i>Qué es y cómo se ha estudiado el emprendimiento social: Análisis de tendencias y revisión sistemática de la literatura</i>	Natalia Valentina Castro Jiménez, Ruth Alejandra González Serna, Lizeth Fernanda Serrano Cárdenas	453
<i>Desarrollo y aplicación de un instrumento para medir el grado de madurez de los valores Customer Orientation, Excellence, Responsibility, Teamwork CERT en las organizaciones</i>	Claudia Yadira Rodríguez Ríos, María Paula Sánchez López, Santiago Cárdenas Jiménez	463
<i>Diseño y validación por el método de elementos finitos del pedestal de la grúa para un buque de apoyo logístico</i>	David Ricardo Alvarado Carvajal, Edison Eduardo Flores Delgado, Omar David Vásquez Berdugo	472
<i>Desempeño en mar de botes de planeo y su efecto sobre la integridad física de la tripulación</i>	Roberto Algarín, Antonio Bula	484
<i>Análisis de la contribución de los aeropuertos regionales al desarrollo de la red doméstica de transporte aéreo. Caso de estudio: Colombia</i>	Oscar Díaz Olariaga	496

<i>Caracterización fisicoquímica de gilsonita y evaluación de su uso en aplicaciones para infraestructura vial</i>	Denier Yela Jaramillo, Gloria Restrepo	506
<i>Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de un suelo vial aditivado con productos químicos</i>	Eliana Llano, Gloria Restrepo, Dairo Vanegas	516
<i>La importancia de la composición química en los biocombustibles de aceite de colza y ricino en la generación de agua durante la combustión</i>	Jorge Israel Noriega Lozano, Belén Alejandra Contreras Mendoza, Beatriz Romero Ángeles, Juan Carlos Paredes Rojas, Guillermo Urriolagoitia Sosa	525

Presentación

No cabe duda de que una de las áreas con mayores aportes al desarrollo de la humanidad es la Ingeniería, acompañada en todo momento con los principios y herramientas de las Ciencias Computacionales. Dada la importancia de ambas áreas del conocimiento, muchos autores han dedicado tiempo y esfuerzo a publicar libros, en todos los idiomas, en los que incluyen lo nuevo que surge cada día desde los laboratorios e industrias. Pero se quedan cortos en el sentido de que esa información es efímera, ya que toma más tiempo la edición del libro que el surgimiento de un nuevo desarrollo.

Por eso es que tiene mayor relevancia para la academia, la industria y la sociedad en general, cuando la publicación se esmera por divulgar los resultados de las investigaciones, de las experiencias y de los errores que en todo momento llevan a cabo y descubren investigadores en todas partes. Con esto en mente, el presente libro es la materialización del trabajo de un grupo de investigadores interesados en publicar lo que hacen, descubren y experimentan, además de las buenas prácticas, pero también de los errores y grandes logros que les deja su trabajo.

Los investigadores que escribieron cada uno de los capítulos en que se divide esta publicación provienen de Colombia, Perú, Argentina, Panamá, Ecuador, España, Brasil, México, Chile y Nicaragua, y contaron con el apoyo de instituciones donde la investigación es una cuestión estratégica. Esa sinergia entre talento humano, apoyo institucional e investigación es la que hace posible los descubrimientos, propuestas y desarrollos que el lector encontrará en las siguientes páginas.

Los capítulos denotan una estructura seria, organizada y científica, cuyo contenido permite una lectura amigable en disciplinas como las Ciencias Computacionales y las ingenierías de Minas, Ambiental, Naval, Industrial, Mecánica, Electrónica, Biomédica, Química, Civil, Aeronáutica, de Materiales y Mecatrónica. Como se puede observar, se trata de un trabajo de amplia cobertura y de un contenido maravilloso, que le aporta a la academia, la industria y a la ciencia en general gran parte del conocimiento que necesitan para continuar con el nivel de desarrollo que han alcanzado hasta el momento.

El libro ha pasado por la revisión de pares que, luego de un arduo trabajo de análisis y de presentar observaciones, determinaron que cumplía con todos los estándares y requisitos para considerarse como producto de investigación. La publicación es, por lo tanto, la materialización del esfuerzo que cada uno de los autores ha invertido en su trabajo, de las incontables jornadas de análisis, procesos y reprocesos que tuvieron que vivenciar hasta estructurar los capítulos que aquí se publican. Todo esto no puede pasar inadvertido y tiene que mostrarse a la sociedad, tal y como se hace con la presentación de este gran texto.

La editorial IAI le agradece a cada uno de los autores, al editor, a los diagramadores, al corrector de estilo, a los revisores y a todos los que, de una u otra manera, aportaron ideas y materializaciones para que esta publicación fuese posible. Sin ellos no se hubiese logrado compilar, editar y publicar esta obra que hoy se presenta en sociedad, por lo que el agradecimiento puede quedarse corto cuando se vislumbra la grandeza del producto que logró este equipo de trabajo.

Estamos convencidos de que el esfuerzo invertido y el trabajo desinteresado de todo ellos se ve recompensado con la publicación de este libro: *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*, que arriba a su quinta edición y que tenemos como objetivo seguir publicando por muchas ediciones más.

Caracterización y cuantificación de microplásticos en los sedimentos y la columna de agua del río Magdalena en la ciudad de Neiva, Colombia

Heidy Calderón Quimbaya
Paula Martínez Silva
Jorge Leonardo Muñoz Yustres
Corporación Universitaria del Huila, Colombia

La presencia de microplásticos en los ecosistemas acuáticos es un tema de suma preocupación actualmente, puesto que su ingestión genera fenómenos ecotóxicos y problemas de salud en los seres vivos. El río Magdalena, uno de los ecosistemas estratégicos más importantes del país y quien representa una fuente de beneficios económicos, sociales y culturales para la ciudad de Neiva, no es ajeno a la contaminación por microplásticos, generada principalmente por actividades antrópicas, de cuyos impactos desafortunadamente, existe un enorme desconocimiento. En esta investigación se estudió el contenido de microplásticos, de acuerdo con su forma, presentes en el río Magdalena en muestras de columna de agua y sedimentos a la altura de la ciudad de Neiva y en tres puntos de muestreo: 1) antes de Neiva, 2) en el malecón de Neiva, y 3) a la salida de Neiva. Las muestras se procesaron y analizaron en el laboratorio de limnología de la Corporación Universitaria del Huila (CORHUILA). Se encontraron en total 999 microplásticos, con una mayor abundancia en la zona 3; la forma más abundante de microplástico en todas las muestras fueron las microfibras y las microesferas que solo se encontraron en las muestras de sedimentos. Con base en los resultados se pudo confirmar que la ciudad de Neiva genera un aporte significativo de microplásticos al río, surgiendo la necesidad de desarrollar mecanismos preventivos para minimizar la concentración de los mismos.

1. INTRODUCCIÓN

El plástico fue creado hace 150 años como un material ligero, fuerte y económico, con el fin de satisfacer las necesidades del hombre en la cotidianidad, ahora está presente en diversos ambientes marinos contribuyendo a la contaminación emergente y silenciosa para los seres vivos. En los últimos años existen innumerables estudios que demuestran la presencia de microplásticos en el océano, estuarios y cuerpos de agua [2]. Del plástico producido más del 40% es de un solo uso y alrededor de ocho millones de toneladas de este material terminan en el océano; su presencia ha sido reportada desde playas, agua superficial, sedimentos marinos y biota acuática.

Los desechos plásticos, vertimientos de aguas residuales y lixiviados que reciben las aguas superficiales (ríos, lagos, lagunas, quebradas, entre otros), se degradan y se desintegran en pequeños polímeros (generalmente polietileno, poliestireno o polipropileno) con un diámetro menor a 5mm, que por su tamaño se le conoce como microplástico [29]. Los residuos plásticos se clasifican según su tamaño en, macroplástico (> 25 mm), mesoplástico (5 a 25 mm), grandes microplásticos (1 a 5 mm), pequeños microplásticos (20 μ m a 1 mm) y nanoplásticos (> 20 μ m) [30]. Los Plásticos ambientales se clasifican en grupos heterogéneo de desechos sólidos y se pueden caracterizar por diversos factores, de acuerdo con el tamaño, origen, forma, tipo de polímero, y color [17].

De acuerdo a su origen hay dos tipos de microplásticos, los microplásticos primarios que se fabrican de ese tamaño, por ejemplo, como gránulos de resina (materias primas para productos de plástico) o como aditivos para productos de cuidado personal (geles de ducha, cremas dentales, exfoliantes, etc.) y microplásticos secundarios que son el producto de la degradación de los artículos de plástico más grandes por la radiación ultravioleta y la abrasión física [17, 30].

Los microplásticos son absorbidos por la biota y se pueden acumular en la cadena alimenticia del plancton y el zooplancton, afectando el tracto digestivo o los tejidos, interrumpir la alimentación y causar problemáticas en las funciones energéticas de las algas y los crustáceos en particular la subclase de copépodos que habitan en aguas dulces [27], sigue la contaminación por compuestos orgánicos hasta finalmente llegar a los peces que se alimentan de sus presas expuestas a estos contaminantes y seguir acumulándose en las demás especies [10], los vertebrados y mamíferos de estos ecosistemas acuáticos se verían involucrados con esta problemática debido a que son los mayores depredadores en especial el ser humano [1].

Con respecto a la ciudad de Neiva el río Magdalena presenta concentraciones de microplástico, con base al aporte que recibe de las actividades domésticas, pesquera, industrial y el turismo, así mismo la falta de una planta de tratamiento de aguas residuales eficiente para reducir la concentración de microplástico en este ecosistema acuático.

En el Huila se ubica la cuenca alta del río Magdalena aportando grandes beneficios económicos, social, cultural y ambiental, cabe resaltar que no existen estudios relacionados con los microplásticos ni mucho menos se relaciona esta problemática con soluciones necesarias para minimizar la generación de contaminantes plásticos en las fuentes hídricas que desembocan en este río.

2. MÉTODO

2.1 Área de estudio

En la Figura 1 se observa el mapa del municipio de Neiva con los 3 puntos de muestreos de la investigación de microplástico. El río Magdalena atraviesa de sur a norte todo el sur del departamento del Huila especialmente la ciudad de Neiva, donde se encuentra ubicado el Malecón, uno de los sitios turísticos de la región ya que se observa el recorrido del afluente y sus tradiciones culturales y sociales. El río se ve principalmente afectado por la ciudad de Neiva, la cual deposita las aguas residuales en ese afluente, la ciudad de Neiva cuenta con un número aproximado de 340.000 personas y un área de 1553 km².

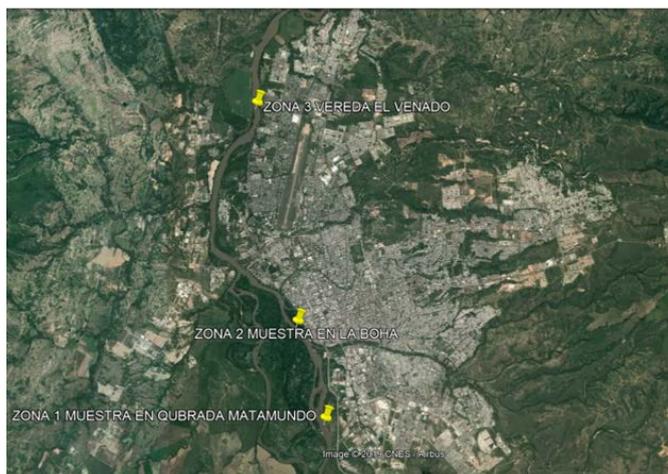


Figura 1. Puntos de recolección de muestras en el río Magdalena en la ciudad de Neiva

El desarrollo de este proyecto de investigación comienza por la recolección de muestras de sedimentos y la columna de agua del río Magdalena para determinar la concentración de microplástico presente en las dos partes del río y finaliza en el laboratorio de la universidad CORHUILA dando así los resultados de la cuantificación y clasificación de microplástico presente en el afluente.

2.2 Recolección de muestras

Se tomaron 6 muestras en total, dos por cada punto de muestreo, una de agua superficial y otra de sedimentos en la playa del río, las tres zonas de muestreo son las siguientes: 1) aguas arriba de Neiva, cerca de la desembocadura de la quebrada Matamundo, 2) al frente de la zona de los pescadores, en el Malecón ($2^{\circ}55'57.88''N$ y $75^{\circ}18'15.85''O$), y 3) aguas abajo del vertimiento de aguas residuales de la ciudad ($2^{\circ}59'13.13''N$ y $75^{\circ}17'2.49''O$).

El protocolo para la toma de muestras de sedimentos y de agua ha sido descrito por varios autores [7, 20, 25] y se realizaron modificaciones para adaptarlo según las condiciones del área de estudio. Para la toma de muestras de agua se realizó en una lancha en los tres puntos de muestreos recolectando muestras con una red de fitoplancton de 20um a una profundidad de 20 cm, a velocidad de 2 nudos durante treinta minutos por cada punto de muestreo y se dispuso en recipientes de vidrio de 600 ml previamente rotulados para evitar cualquier tipo de contaminación y ser llevada al laboratorio para su análisis [6, 18, 20]. La toma de muestras de sedimentos se realizó en la superficie de la playa del río Magdalena en las zonas donde el río alcanza a subir en temporada de aguas altas, mediante el uso de cuadrantes de 0.5 m por 0.5 m, se retiró la capa superficial con una pala de jardinería y se depositó en un recipiente de vidrio sellado y rotulado 3 kg de muestras en cada zona con el propósito de ser analizada en el laboratorio [6, 25].

2.3 Análisis de laboratorio

Una vez en el laboratorio las muestras de sedimentos fueron secadas a temperatura ambiente y luego pasadas por un tamiz de 4 mm, teniendo en cuenta que es el método más utilizado en separación por densidad de microplástico [26]. Las partículas con mayor tamaño se acumulan en la malla, de esta forma se remueven los restos de materia orgánica, huesos, vidrios, entre otros y las partículas más finas se decantan. Finalmente se utiliza la muestra decantada [20]. Luego de tener listas las muestras de sedimentos se le agrega agua del grifo hasta que esté por encima de los sedimentos, de igual modo el recipiente que contiene las muestras de columna de agua.

A cada muestra se le agregan 1.2 kg/L de NaCl, para lograr una solución hipersalina, con el fin de que las partículas de plástico con menor densidad como el polietileno, polipropileno y el poliestireno floten en la superficie [2], mientras que las partículas pesadas, tales como granos de arena se depositan rápidamente [7, 20]. Para el proceso de separación se usó NaCl con el propósito de utilizar una sal económica y de uso común que no genera ningún tipo de contaminación

al medio ambiente [2]. La clasificación de los microplásticos según su forma (Fragmento, Fibra y Microesfera), se realizó utilizando un microscopio óptico, en aumentos 10X y 40X con la ayuda de una persona con experiencia en esta metodología [6, 7, 9]. Finalmente, los resultados obtenidos se expresaron en números totales de partículas encontradas en el volumen de agua y sedimentos, es así que en las muestras en columna de agua se tomaron partículas/m³ y en los sedimentos partículas/Kg, según lo expresado en la metodología de [13].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En los resultados arrojados según la investigación realizada se recolectaron en total 999 microplásticos, los cuales se cuantificaron y clasificaron en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados arrojados por la investigación de microplástico

	Zona 1						Zona 2						Zona 3					
	Aguas			Sedimentos			Aguas			Sedimentos			Aguas			Sedimentos		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Fibras	36	25	35	20	30	26	40	35	33	27	40	50	45	60	30	107	120	80
Fragmentos	5	3	5	12	15	5	7	4	12	5	7	3	10	6	12	7	14	16
Microesferas	0	0	0	1	1	4	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	2	0

En esta investigación se filtraron 200 litros de agua en cada punto de muestreo, es decir 0,2 metros cúbicos y se muestrearon 3 Kg de sedimentos en cada punto. Los resultados observados en la Tabla 2 se expresan en partículas/m³ para la columna de agua y en partículas/Kg para sedimentos.

Tabla 2. Cuantificación de microplásticos con relación al volumen de las muestras filtradas

	Zona 1						Zona 2						Zona 3					
	Aguas			Sedimentos			Aguas			Sedimentos			Aguas			Sedimentos		
	Microplásticos/m ³			Microplásticos/Kg			Microplásticos/m ³			Microplásticos/Kg			Microplásticos/m ³			Microplásticos/Kg		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Fibras	180	125	175	6,67	10	8,67	200	175	165	9	13,3	16,7	225	300	150	35,7	40,0	26,7
Fragmentos	25	15	25	4	5	1,67	35	20	60	1,67	2,33	1	50	30	60	2,33	4,67	5,33
Microesferas	0	0	0	0,33	0,33	1,33	0	0	0	0,33	0	0,33	0	0	0	0,67	0,67	0,00

Se cuantificó y clasificó las formas de los microplástico en las 3 zonas de muestreo unificando las submuestras en un solo resultado por cada zona según la Tabla 1. Los datos observados en la Figura 2 son representados en números de microplásticos en sedimentos y muestras de agua.

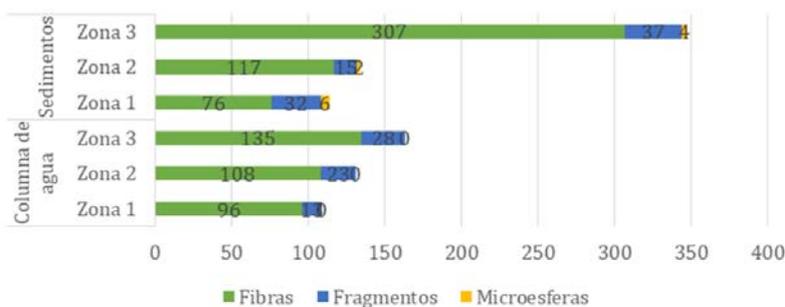


Figura 2. Número de microplásticos en las 3 zonas de muestreo

Las muestras recolectadas en los tres puntos del río Magdalena contienen aportes provenientes de los municipios ubicados al sur del departamento del Huila, por actividades antrópicas y vertimientos de aguas residuales e industriales de afluentes como ríos y quebradas, así mismo, los embalses del Quimbo y Betania representan aportes importantes de microplásticos debido a actividades como la piscicultura y el turismo principalmente [31]. Los microplásticos más abundantes de las 3 zonas de muestreo corresponden a las microfibras, esto se debe a que la mayoría proviene de aguas residuales domesticas de las lavadoras y al desgaste de las redes de los pescadores [13].

En la Figura 3 se observa las imágenes de microfibras obtenidas en el microscopio con un aumento de 20X, tomadas en el Laboratorio de Limnología de CORHUILA y en la Universidad de Oklahoma, en segundo lugar están los fragmentos, la mayoría de los cuales corresponden a la degradación de elementos plásticos arrojados a las fuentes hídricas y por ultimo están las microesferas que solo se encontraron en sedimentos, debido a su alta densidad, y cuyo origen son principalmente productos de belleza vertidos a las aguas residuales.

Estudios realizados en otros países han encontrado de igual manera que el 87% de los microplásticos corresponde a las fibras que salen de las plantas de tratamiento de aguas residuales por el lavado de ropa elaborada por polímeros sintéticos, el 6% a los fragmentos debido a la fragmentación de plástico y el 3% a microesferas de productos de belleza y aseo personal [14, 21].

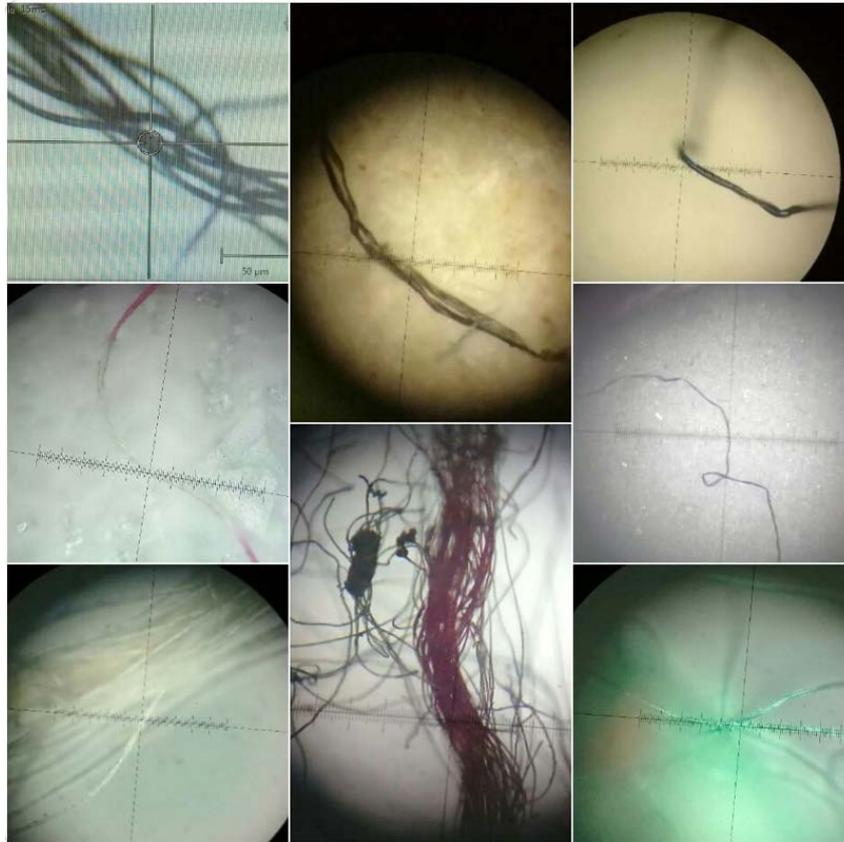


Figura 3. Microfibras observadas en el microscopio con un aumento de 20X

La zona 1 antes de la ciudad de Neiva (Tabla 1), coincide con la carga de contaminantes que recibe el río de la quebrada Matamudo ubicada en la zona industrial al sur del municipio de Neiva por tal motivo la clasificación de microplástico más abundantes son las microfibras, así mismo provenientes de los vertimientos de municipios ubicados al sur del departamento y otros cuerpos de agua como la represas del Quimbo y Betania representan un aporte agregado a la cantidad de microfibras que se concentran más en la columna de agua, debido a que las fibras requieren más tiempo en concentrarse en los sedimentos porque son de muy baja densidad [31].

En esta zona, se ve la influencia no solo de aguas residuales domésticas que contienen polímeros sintéticos del lavado de las prendas de vestir [11, 23], sino también de la Isla parque, donde habitan aproximadamente 4 familias, quienes adquieren el suministro de agua del río Magdalena ya que no cuentan con acueducto de agua potable ni con alcantarillado, almacenando estas aguas negras en un pozo séptico que luego son vertidas directamente al río, los residuos sólidos no cuentan con un sistema de recolección siendo vertidos directamente al río. En esta zona se encontraron microesferas en sedimentos, lo que se interpreta como el resultado de los aportes que recibe el río de los productos de aseo personal y belleza, generando una carga de ellas en la columna de agua y los sedimentos [16].

En la zona 2 se presenta una alta concentración de microfibras en la columna de agua (tabla 1 y figura 2). Esta zona denominada como el Malecón, se caracteriza por la presencia de pescadores que utilizan métodos de pesca artesanal aportando importantes cantidades de materiales plásticos en las redes de pesca, que flotan en la columna de agua y se depositan en los sedimentos [5, 22]. Otra actividad económica importante de esta zona, es el turismo, que genera un amplio consumo de residuos sólidos especialmente botellas PET y bolsas plásticas, que se depositan y descomponen en la columna de agua, fragmentándose por acción mecánica del agua y por acción de los rayos solares hasta convertirse en fragmentos que hacen parte de los sedimentos o que flotan libremente en la columna de agua, estando a disposición en el ecosistema acuático [3]. En esta zona no se encontraron microesferas, debido a que esta zona es de uso comercial, por tal razón se presentan mayores residuos plásticos.

Por último, obtenemos la zona 3, que concuerda con el vertimiento de aguas residuales que genera la población en el municipio de Neiva, debido a las actividades económicas, domésticas e industriales, y a la evidente falta de una PTAR en la ciudad. Las microfibras son las más abundantes tanto en la columna de agua como en los sedimentos, lo cual se debe a la contaminación del río por aguas grises y negras provenientes de actividades domésticas e industriales que incluyen el agua proveniente de las lavadoras, enriquecidas con microfibras provenientes de polímeros sintéticos de baja densidad que flotan en la superficie y se acumulan en los sedimentos [11, 23]. Así mismo se encontraron varios fragmentos de microplásticos que resultan principalmente del consumo desequilibrado de los productos elaborados con plásticos, generalmente plásticos de un solo uso [28], que luego son irresponsablemente desechados directamente sobre el río Magdalena a causa de las malas prácticas de recolección de residuos sólidos en puntos

destinados, la falta de conciencia ciudadana y el sentido de pertenencia por los recursos naturales del municipio, estos plásticos entran en un proceso de fragmentación física y química hasta convertirse en microplásticos [13, 22].

Hay que mencionar, además la contribución de fragmentos debido a los lixiviados de residuos plásticos que son arrojados a los afluentes que desembocan en el río Magdalena al norte de la ciudad como son la quebrada la Toma, la Cucaracha y el Venado, representando cantidades de descargas de aguas residuales de las comunidades aledañas a los afluentes [11]. Por otro lado, el aporte que recibe de los materiales plástico necesarios para la elaboración en redes de enmalle, redes de arrastre, redes de superficie, trampas, arrobaderas, calamateras, anzuelos y cables, utilizados para la actividad pesquera son los hilos de plástico no flotantes y el nylon que representa el mayor consumo para esta actividad [13, 22].

En la zona 3 se observaron (tabla 1) pocas partículas de microesferas en sedimentos, esto ocurre debido a su alta densidad y por ende se depositan en los sedimentos y no flotar en la columna de agua, además provienen de productos de belleza como exfoliantes para la piel, desodorantes, limpiadores faciales, cremas dentales, entre otros, los cuales son vertidos al río [11, 12, 31].

Las actividades que se presentan en cada zona adicionan cierto porcentaje de microplásticos ocasionando contaminación en el río y deterioro en la calidad de especies que habitan en este ecosistema (Tabla 2), en la zona 3 la fauna presenta el mayor nivel de riesgo, esto se debe a la exposición de los altos niveles de microplástico en columna de agua y en sedimentos, afectando las especies de fauna y flora presentes en el río. Varias investigaciones, han intentado determinar el efecto que generan los microplásticos sobre la biota, como resultado han logrado determinar que la ingestión y absorción de los microplásticos y los contaminantes orgánicos persistentes que estos absorben, generan efectos adversos en muchas especies de fauna y microfauna en el agua, igualmente disminuyen la capacidad fotosintética de microalgas y plantas acuáticas [15, 19].

Existen varias investigaciones sobre los impactos que generan los microplásticos por sus características propias y por su capacidad de absorber y acumular contaminantes como metales pesados, entre otros, que se acumulan en los diversos niveles de la cadena trófica afectando cada nivel de muchas formas, varias de las cuales aún se desconocen, causando entre otras cosas, malformaciones, efectos cancerígenos, interrupciones en el sistema neurológico y produciendo efectos en la movilidad y reproducción en la biota [24, 28].

Según la investigación de [8] los microplásticos de fragmentos de cloruro de polivinilo (PVC) y perlas de poliestireno virgen (PS) expuestos a los ambientes acuáticos absorben los metales pesados depositados en las pinturas como son el zinc (Zn) y cobre (Cu), este estudio hace énfasis en los impactos que pueden generar esta relación a la fauna y a su vez resaltan la importancia de monitorear los residuos sólidos depositados en los ambientes acuáticos y la disposición final de las pinturas anticrustantes.

Por otra parte, los efectos de los microplásticos se hacen más dominantes ya que hacen que se propaguen microorganismos como bacterias, patógenos y especies invasoras que son resistente a los ambientes sintéticos, es así que el ecosistema empieza a perder biodiversidad nativa y endémica de la zona, además altera el equilibrio ecosistémico acuático y terrestre. Según el estudio desarrollado por [4] los ecosistemas más expuestos a este fenómeno son las quebradas y los ríos, ya que se encuentran expuestos a los asentamientos humanos y a las actividades antrópicas.

Es necesario realizar un llamado a todos los entes territoriales de nuestro país para que inviertan en investigaciones sobre el estado actual de las fuentes hídricas de nuestro territorio ya que es un recurso que debe de estar en buenas condiciones para ser aprovechable por los seres vivos, pero principalmente en la inversión de Plantas de Tratamiento de Aguas Residual que cuenten con tecnologías de tratamiento que permitan eliminar al menos gran parte, la carga de microplásticos presente en las aguas residuales [23]. Se requieren más estudios en Colombia sobre los microplásticos en los diferentes departamentos, por los cuales hace su recorrido el río Magdalena con el propósito de conocer cuál es el aporte que recibe el mar caribe en boca de ceniza donde desemboca el río más importante del país, ya que según estudios comprueban que los mares y océanos albergan la mayor carga de contaminantes de microplásticos, a causa de las aguas que recibe de los cuerpos de agua urbanos como los ríos, quebrada y arroyos [4].

4. CONCLUSIONES

Neiva aporta una importante concentración de microplásticos al río Magdalena provenientes principalmente de actividades domésticas, piscícolas, pesqueras, industriales y turísticas. La cantidad de micro plásticos encontrados en la ciudad de Neiva se debe principalmente a la carencia de una planta de tratamiento de aguas residuales que sea eficiente para remover la mayoría de los contaminantes emergentes de las actividades domésticas, comerciales e industriales de la ciudad y a la falta de educación ambiental y cultura ciudadana en cuanto a procesos de reciclaje y tratamiento de residuos sólidos que convierten al río Magdalena en uno de los principales vertederos de desechos sólidos en la ciudad.

Hasta el momento no se ha realizado estudios en la región sobre el efecto de los microplásticos en la flora y la fauna de este importante ecosistema, lo cual es indispensable para mitigar los impactos que generan los plásticos y microplásticos en los ecosistemas acuáticos, especialmente en un río como el Magdalena que constituye una de las principales fuentes de actividad pesquera y comercio en nuestro país.

Este estudio sirve como línea base para el desarrollo de nuevas investigaciones en microplásticos y podría permitirles a las autoridades competentes tener una herramienta para generar normas y leyes con respecto al manejo de residuos plásticos en el país.

REFERENCIAS

- [1] Anbumani, S. y Kakkar, P. (2018). Ecotoxicological effects of microplastics on biota: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15), 14373-14396.
- [2] Andrady, A. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine pollution bulletin*, 119(1), 12-22.
- [3] Araujo, C. et al. (2018). Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. *Water Research*, 142, 426-440.
- [4] Arias, M., Rojas, K. y Grossart, H. (2019). Collateral effects of microplastic pollution on aquatic microorganisms: An ecological perspective. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 234-240.
- [5] Tintoré, B. (2016). Abundancia y distribución de microplásticos y posibles impactos sobre el rorqual común (*Balaenoptera physalus*) en las costas del Garraf. Trabajo final de grado. UST.
- [6] Barrows, A. et al. (2017). Grab Vs. neuston tow net: A microplastic sampling performance comparison and possible advances in the field. *Analytical Methods*, 9(9), 1446-1453.
- [7] Bergmann, M., Gutow, L. y Klages, M. (2015). Marine anthropogenic litter. *Marine Anthropogenic Litter*, 38, 1-447.
- [8] Brennecke, D. et al. (2016). Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 178, 189-195.
- [9] Barrows, A. (2017). National Microplastics Field Methodology Review. College of the Atlantic.
- [10] Cole, M. et al. (2015). The impact of polystyrene microplastics on feeding, function and fecundity in the marine copepod *Calanus helgolandicus*. *Environmental Science and Technology*, 49(2), 1130-1137.
- [11] Cole, M. et al. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588-2597.
- [12] Fendall, L. y Sewell, M. (2009). Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. *Marine Pollution Bulletin*, 58(8), 1225-1228.
- [13] Gago, J. et al. (2018). Synthetic microfibers in the marine environment: A review on their occurrence in seawater and sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 365-376.
- [14] Negrón, G. (2015). Sobre las microesferas o micropartículas. *Carta periódica*, 1-13.
- [15] Greenpeace. (2016). Plásticos en el pescado y el marisco. Greenpeace.
- [16] Leslie, H. (2015). Are we polluting the environment through our personal care? The Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-based Activities (GPA).
- [17] Hanke, G. (2013). Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas. Joint Research Centre.
- [18] Karkanorachaki, S. et al. (2018). Plastic pellets, meso- and microplastics on the coastline of Northern Crete: Distribution and organic pollution. *Mar. Pollut. Bull.*, 133, 578-589.
- [19] Lee, H., Lee, H. y Kwon, J. (2019). Estimating microplastic-bound intake of hydrophobic organic chemicals by fish using measured desorption rates to artificial gut fluid. *Science of the Total Environment*, 651, 162-170.
- [20] Li, J., Liu, H. y Chen, J. (2018). Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research*, 137, 362-374.
- [21] Luo, W. et al. (2019). Comparison of microplastic pollution in different water bodies from urban creeks to coastal waters. *Environmental Pollution*, 246, 174-182.
- [22] COFI (2011). La función de la FAO para la mejor integración del desarrollo y la gestión de la pesca y la acuicultura, la conservación de la biodiversidad y la protección del medio ambiente. UNESCO.
- [23] Murphy, F. et al. (2016). Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environmental Science and Technology*, 50(11), 5800-5808.
- [24] Ogonowski, M., Gerdes, Z. y Gorokhova, E. (2018). What we know and what we think we know about microplastic effects – A critical perspective. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 41-46.
- [25] Purca, S. y Henostroza, A. (2017). Presencia de microplásticos en cuatro playas arenosas de Perú. *Rev. peru. biol.*, 24(1), 101-106.
- [26] Prata, J. et al. (2019). Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 110, 150-159.
- [27] Rillig, M. (2012). Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environmental Science and Technology*, 46(12), 6453-6454.
- [28] Rojo, E. y Montoto, T. (2017). Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global. Recuperado de: <https://www.ecologistasenaccion.org/IMG/pdf/informe-basuras-marinas.pdf>.
- [29] Torres, J. (2013). Los microplásticos como transportadores de metales pesados en agua: Estudio Cinético. Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Cartagena.
- [30] Wagner, M. et al. (2014). Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. *Environmental Sciences Europe*, 26(1), 1-9.
- [31] Watkins, L. et al. (2019). The effect of dams on river transport of microplastic pollution. *Science of the Total Environment*, 34(6), 834-840.

Aplicación del Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares IVE en la estimación de las emisiones contaminantes provenientes de fuentes móviles

Nilda Hilario Román¹

Hernán Baltazar Castañeda²

Walter Pardavé Livia³

¹Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú

²Universidad Nacional del Centro Perú, Perú

³Universidad de Santander, Colombia

En este capítulo se presenta una herramienta básica para la gestión de la calidad del aire de la ciudad de Huancayo, ubicado en la región central del Perú, con la idea de capturar información relevante para superar la contaminación del aire. La investigación tiene como principal objetivo, estimar la cantidad de emisiones contaminantes de vehículos en el distrito de Huancayo para el año 2016. La metodología está basada en el Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), para contaminante criterio y gases de efecto invernadero. La recolección de datos fue prospectiva, se caracterizó la flota vehicular, se recopiló información de tecnología vehicular mediante encuestas; paralelamente, se realizaron grabaciones y conteo vehicular para determinar la fracción de categorías vehiculares. Se determinaron los patrones de conducción de las diferentes categorías vehiculares, mediante el software Speed Analysis Evaluation y la unidad de posicionamiento global satelital (GPS), el procesamiento de la información ingresada al modelo generó 44.511,4 toneladas anuales de contaminantes criterio; el monóxido de carbono (CO) se emite en mayor cantidad con 36.348,4 Tm/año y en menor cantidad los óxidos de azufre (SO_x) con 38,8 Tm/año. Los gases de efecto invernadero equivalen a 255.824,9 toneladas anuales, donde el dióxido de carbono (CO₂) se emite en mayor cantidad con 255.047,4 Tm/año y en menor cantidad los óxidos nitrosos (N₂O) con 7.3 Tm/año, los automóviles es la categoría que más aporta contaminantes.

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo la preocupación de todos es la contaminación ambiental y el cambio climático, las diversas actividades del hombre vienen agudizando este problema. Los reportes nos indican que la contaminación atmosférica es un problema más grave en las ciudades (OMS, 1999), estas sustancias incluyen varios gases y materia particulado, que se encuentran en suspensión en el aire [1].

En el año 2004 en la ciudad de Huancayo se realizó el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes móviles y fijas, el inventario de emisiones se limitó a la guía de Evaluación de Fuentes de Contaminación del Aire de Alexander P. Economopoulos, extraído de la serie de tecnologías ambientales de la OMS, el modelo presenta limitaciones como: no evalúa patrones de conducción así mismo no contempla datos ambientales de la localidad de estudio. Los reportes de monitoreo de la calidad del aire indican que se presenta niveles de contaminación moderada para parámetros de material particulado (PM_{2.5}) y niveles de contaminación mala para parámetros de dióxido de azufre (SO₂) [2, 3].

Es necesario actualizar la información de inventario de emisiones de la ciudad de Huancayo, con modelos más apropiados y flexibles, que permita adoptar políticas ambientales más efectivas en la reducción y control de las emisiones de fuentes móviles, y poseer información para evaluaciones retrospectivas y prospectivas de concentraciones de contaminantes en el aire, toda vez que el Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014 presenta la información para los parámetros de calidad del aire de diferentes ciudades del Perú y no reporta información de inventario de emisiones para la ciudad de Huancayo, para la actualización de los planes de acción elaborado el año 2005 para la mejora de la calidad del aire.

La investigación tuvo como objetivo estimar la cantidad de emisiones contaminantes de vehículos en el distrito de Huancayo, la población fue de 61 504 vehículos el año 2016, utilizando el Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), específicamente de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio [4].

2. MÉTODO

Para el desarrollo de la investigación se requirieron las siguientes herramientas e instrumento:

- Modelo IVE versión 2.0, software Speed Analysis Evaluation
- GPS
- Encuesta
- Videograbación

La estimación de las emisiones contaminantes provenientes de las fuentes móviles en el distrito de Huancayo, provincia de Huancayo, región Junín para el año 2016, se realizaron mediante la metodología general del Modelo IVE. En la Figura 1 se visualiza la Zona de estudio.

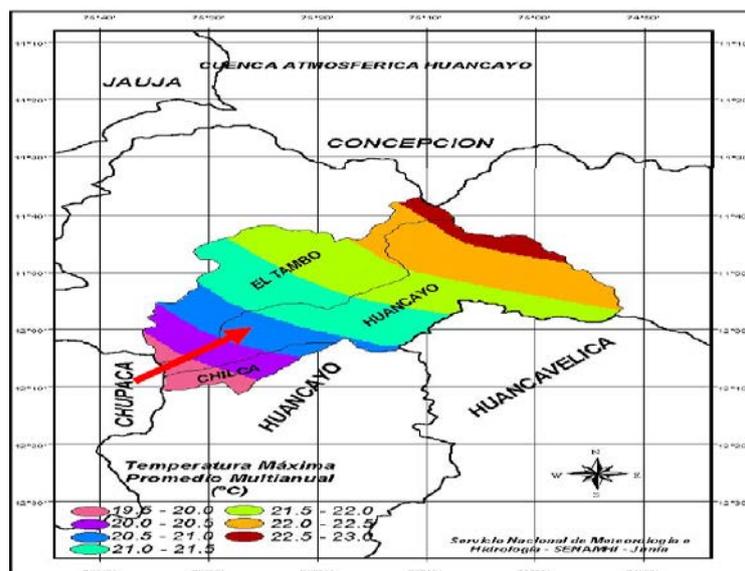


Figura 1. Zona de estudio de emisiones contaminantes de vehículos

Las emisiones del tubo de escape de toda la flota de vehículos que circulan en la ciudad pueden ser descritas por medio de la ecuación (1).

$$E_{ij} = NV_j * DA_j * FE_{ij} \quad (1)$$

Donde:

E_{ij} : Emisión total del contaminante i , del tipo de vehículo j (CO, NO_x, o HC, etc.)

NV_j : Número total de vehículos del tipo j (automóvil, taxi, microbús, pick up, etc.)

DA_j : Nivel de actividad de vehículos del tipo j , expresada como la distancia total recorrido por los vehículos en un tiempo determinado y bajo condiciones de circulación conocida (generalmente se expresa en kilómetros recorridos por día o año)

FE_{ij} : Factor de emisión de contaminante i del tipo de vehículo j en cuestión y para las condiciones de circulación de los vehículos expresados en unidades de masa (por ejemplo gramos de contaminante emitido) por distancia recorrida (por ejemplo kilómetros).

A continuación, se explica los procedimientos para la recolección de los datos y procesar la información utilizando el modelo computacional denominado Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE) y determinar emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio.

2.1 Diseño de la investigación

Para el desarrollo de la investigación se utilizó el diseño descriptivo, la población vehicular fue de 61.504 unidades registradas [5], la flota vehicular, para ello se recopiló información de tecnología vehicular mediante la observación y encuestas, paralelamente se realizó videograbaciones y conteo vehicular para determinar la fracción de categorías vehiculares (ver Tabla 1).

Tabla 1. Intersecciones donde se realizó la medición de emisiones [6]

Intersección	Fecha de encuesta y grabación
Puente Huancavelica- Jr. Ayacucho	12 y 14 de diciembre 2016
Calle Real - Jr. Ayacucho	12 y 14 de diciembre 2016
Av. Ferrocarril - Av. San Carlos	13 y 15 de diciembre 2016
Av. Giráldez - Jr. Huancas	13 y 15 de diciembre 2016
Calle Real - Av. Ferrocarril	16 y 19 de diciembre 2016
Av. Huancavelica - Jr. Tarapacá.	16 y 19 de diciembre 2016
Av. José Olaya - Av. Ocopilla	20 y 22 de diciembre 2016

Se determinaron los patrones de conducción de las diferentes categorías vehiculares, mediante el software Speed Analysis Evaluation y las unidades de posicionamiento global satelital (GPS). La variable de estudio emisiones contaminantes de vehículos, dependen de las características del vehículo como: edad del vehículo, nivel tecnológico, tamaño del motor, peso vehicular, el estado de mantenimiento, los patrones de conducción, uso del aire acondicionado, características del combustible, uso vehicular, tipo de vehículo, entre otros [5], es una variable politómicas, para su medición se requirió de instrumento documental e instrumento mecánico. El instrumento documental fue creado y la validez del instrumento abarca la validez genérica de indicadores y la validez específica de ítems.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Distribución de la flota vehicular

La videograbación del parque automotor y conteo vehicular, se realizó para determinar la fracción de categorías que circulan en las vías de la ciudad de Huancayo. La circulación vial fue grabada en las diferentes vías principales y secundarias citadas en la Tabla 1, las fracciones de camiones, motos, camioneta rural, automóvil, Custer, motos-mototaxi y camioneta pick up, estos resultados se muestran en la Figura 2. La recolección de datos se realizó en el mes de diciembre, épocas del año con actividad escolar y horarios que representa la actividad vehicular típica de la zona de estudio en días laborables.

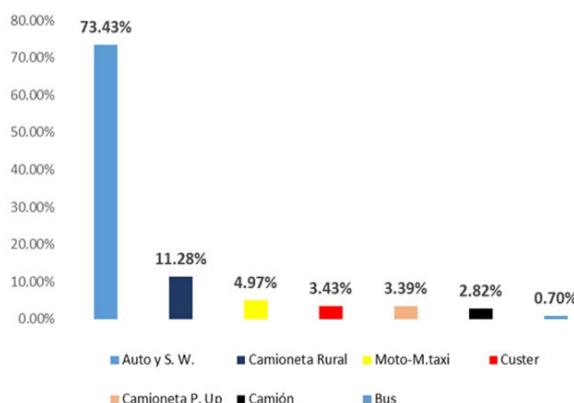


Figura 2. Distribución de categorías vehiculares [6]

3.2 Caracterización de la flota vehicular

Se encuestaron a 382 conductores de vehículos en áreas de estacionamiento y paraderos de los vehículos de transporte urbano e interprovincial, para recoger información sobre tecnología vehicular de los vehículos que operan en la zona de estudio, mediante el muestreo probabilístico estratificado. Se caracterizó la flota vehicular por categorías vehiculares en cuanto a control de gases escape y control aire/combustible como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de control gases escape y control aire/combustible [6]

Categoría vehicular	Air/Fuel control	Cantidad	%	Exhaust control	Cantidad	%
Automóvil	MPI	10 204	100	3-Wy/EGR	10 204	100
Camioneta rural	Direct injection	2 508	49	EGR+Improv	2 508	49
	Pre injection	2 611	51	None	2 611	51
Custer	Pre injection	415	30	Improved	415	30
	Direct injection	969	70	EGR+Improv	969	70
Camioneta pick up	Direct injection	3801	70	EGR+Improv	3801	70
	Pre injection	1629	30	None	1629	30
Camiones 3 - 5 t	Direct injection	906	80	EGR+Improv	906	80
	Pre- injection	226	20	None	226	20
Moto-Mototaxi	4-Cyc, carb	24 547	100	None	24 547	100
				EGR+Improv	81	50
Ómnibus	Direct injection	162	100	None	81	50
				EGR+Improv	81	50

^a MPI (inyección multipunto), 4 cyc (4 tiempos), carb (carburado)

^b3-Wy (catalizador de 3 vías), EGR (recirculación de gases de escape), None (sin sistema de control de emisiones)

Abreviaturas del manual del Modelo IVE 2008

La categoría automóvil, que compone el 73,43% del parque automotor, presenta la tecnología de control aire/combustible la inyección multipunto en un 100 %, utilizan convertidor catalítico de 3 vías, existe una importante fracción de vehículos que utilizan sistemas de control de gases de escape, es decir, son vehículos de los últimos años, estos vehículos operan a gasolina y gas (denominados duales). Las motos, que representan el 4,95% de la flota, son carburadas el 100%, adolecen de sistema de control de emisiones y utilizan gasolina. Las camionetas rurales y buses el 50% de la flota no utiliza ningún sistema de control de gases de escape, la diferencia de estos vehículos es que están equipados con el sistema de inyección electrónica diésel y con sistema de control de gases de escape, estos vehículos utilizan el diésel de combustible. Para el caso de las camionetas pick up, custer y camiones el 73% están equipados con sistema de control electrónico y con sistema de control de gases de escape y el 27% son de pre inyección con motores convencionales sin sistema de control de emisiones. Los aportes de las emisiones de las categorías vehiculares son diferentes, ello se corrobora con la desviación estándar y la varianza.

3.3 Patrones de conducción de los vehículos

Los patrones de conducción comprenden la potencia específica vehicular y estrés del motor, el resultado del procesamiento de datos es la fracción de tiempo recorrido en cada uno de los bins. En la Figura 3 se puede observar

que en todas las categorías vehiculares se generan niveles bajos de estrés, o cargas bajas de operación, agrupando las mayores fracciones de tiempo de operación del motor en el bin 11, que corresponde a valores de VSP de -2,9 a 1,2 kW/ton y un nivel de estrés de -1,6 mínimo y máximo de 3,1 y bin 12 que corresponde a valores de VSP de 1,2 a 5,3 kW/ton y un nivel de estrés de -1,6 mínimo y máximo de 3,1 [7].

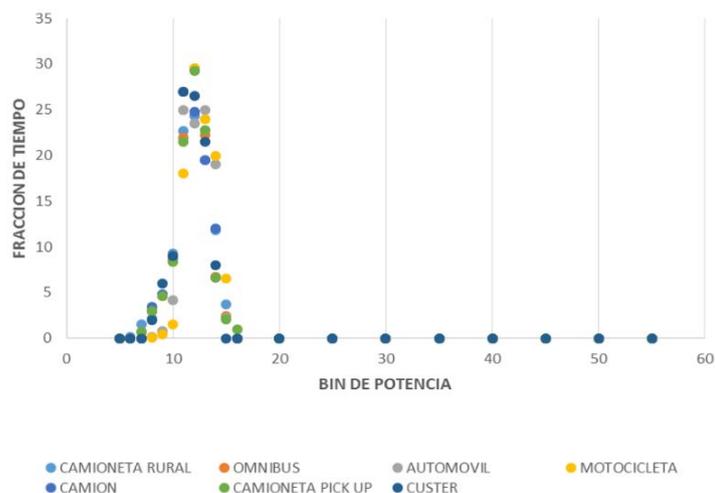


Figura 3. Distribución de bins de categorías vehiculares [6]

Se observa en la Figura 3 que los bins entre el 0 y el 10 se refieren a situaciones donde el vehículo está recibiendo energía tales como bajadas pronunciadas y frenadas (representa el caso de la energía negativos). El bin 11 marca las situaciones cercanas al ralenti y donde el vehículo necesita muy poca energía para mantener el movimiento. Del bin 12 al 19 se refleja situaciones de aceleraciones positivas o nulas en movimiento (representa el caso de la energía positiva) [8].

3.4 Patrones de partida de los vehículos

Diferentes tipos de partidas pueden tener un profundo impacto en las emisiones por el tubo de escape. El efecto más predominante es el periodo de Soak antes de que se produzca la partida. El término Soak del motor se define como el periodo de tiempo que un motor en caliente ha estado apagado antes de volver a ponerlo en marcha, estos ítems fueron contemplados en la encuesta y consolidados, como insumo del modelo IVE. En la Figura 4 se muestra un tramo de vía para la categoría automóvil, donde se recolectó información necesaria para determinar patrones de conducción y de partida.

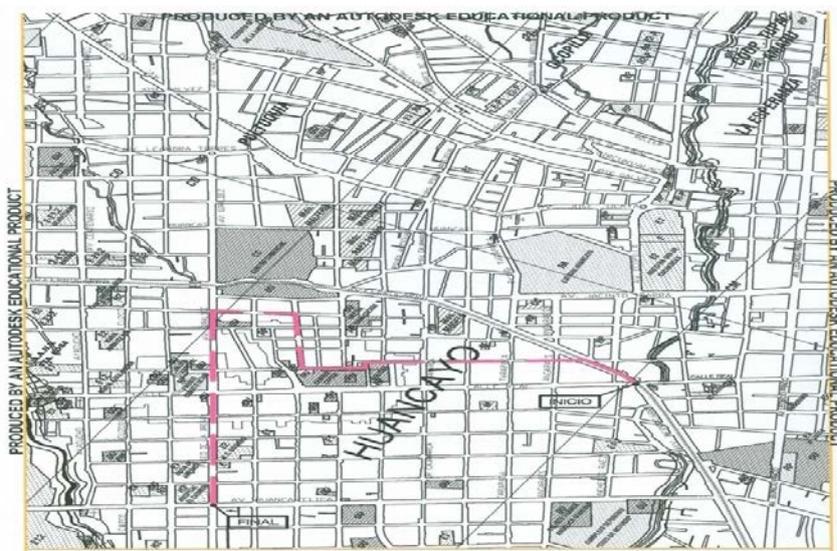


Figura 4. Tramos de vía, donde se recolectó datos para determinar patrones de conducción y de partida- categoría automóvil

3.5 Aportes de emisiones de cada categoría vehicular

En la Tabla 3 se visualiza la participación en la emisión de contaminantes criterio de las diferentes categorías vehiculares que circulan en la ciudad. Las emisiones totales de contaminantes criterio ascienden a 44.511,4 toneladas por año y las emisiones totales de gases de efecto invernadero de las diferentes categorías vehiculares ascienden a 255.825,8 Tm por año (Tabla 4).

Tabla 3. Emisiones de contaminantes criterio de las categorías vehiculares (Tm/año) [6]

Categoría Vehicular	CO	VOC	VOC _{evap}	NO _x	SO _x	PM	Emisión total
Automóvil	21.341,6	2.146,2	91,3	1.441,8	21,9	3,7	25.046,3
Camioneta Rural	105,9	51,1	0,0	94,9	32,9	58,4	343,1
Pick-Up	51,1	7,3	0,0	43,8	3,7	18,3	124,1
Moto -moto taxi	62,1	25,6	0,0	146,0	18,3	47,5	299,3
Custer	14.177,4	1.989,3	324,9	883,3	3,7	102,2	17.680,6
Camión	408,8	211,7	0,0	230,0	58,4	105,9	1.014,7
Ómnibus	1,7	0,5	0,0	0,5	0,1	0,5	3,3
Emisiones Total	36.348,4	4.431,6	2.840,2	2.840,2	138,8	336,3	445.114,0

Tabla 4. Emisiones de gases de efecto invernadero según categoría vehicular (Tm/año) [6]

Categoría vehicular	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	Emisión total
Automóvil	114.303,4	7,3	372,3	114.683,0
Camioneta Rural	58.922,0	0,4	0,0	58.922,4
Pick-Up	33.908,5	0,3	0,0	33.908,8
Moto -mototaxi	25.805,5	0,1	397,9	26.203,5
Custer	16.746,2	0,1	0,0	16.746,3
Camión	5.274,3	0,1	0,0	5.274,3
Ómnibus	87,6	0,0	0,0	87,6
Emisiones Total	255.047,4	8,3	770,2	255.825,8

En el año 2004 en la ciudad de Huancayo se realizó el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes móviles y fijas, el inventario se limitó a la guía de Evaluación de Fuentes de Contaminación del Aire de Alexander P. Economopoulos, se concluye que 43.540 vehículos emitieron 32.656 Tm/año de contaminantes, 18.802 Tm/año de CO, 58% del total; 7.635 Tm/año de NO_x, 23%; y 3.425 Tm/año de COV, 10%. Los vehículos más contaminantes fueron: automóviles, con una emisión estimada de 10.816,42 Tm/año, 33.12% del total; camiones con 9.354,40 Tm/año, 28,64%; y ómnibus con 4.353,42 Tm/año, 13.33%.

En la investigación se estimó la cantidad de emisiones contaminantes provenientes de las fuentes móviles del distrito de Huancayo para ello se utilizó el Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), se concluye que 61.504 vehículos emitieron 44.511,4 toneladas el año 2016 de contaminantes, el monóxido de carbono de 36.348,4 Tm/año representa el 81.66%, seguido de los compuestos orgánicos volátiles de 4.431,6 Tm/año representa el 9,96%, los óxidos de nitrógeno de 2.840,2 Tm/año representa el 6,38%. La investigación precedente y la presente coinciden que el parque automotor genera contaminantes de monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x) en mayor cantidad. No se está realizando la vigilancia del parámetro monóxido de carbono pese a que es el contaminante emitido en mayor cantidad supera más del 50% de los totales emitidos a la atmósfera en las investigaciones realizadas [9, 10].

Los automóviles conforman la mayor proporción del parque automotor, son vehículos modernos portan catalizadores para el control de sus emisiones, sin embargo, el uso de combustible de baja calidad que usan por el costo y las faltas de mantenimiento oportuno del motor, ocasiona la reducción de vida útil de un catalizador y suprimen el catalizador cuando ya no está operativo, lo expuesto fundamenta la generación del monóxido de carbono. Los compuestos orgánicos volátiles contribuyen substancialmente a la formación de agentes contaminadores secundarios tales como ozono troposférico, por la reacción química en luz solar con los óxidos de nitrógeno, que en condiciones meteorológicas y de relieve favorable pudieran presentarse y afectar la salud de la población más vulnerable.

Actualmente la ciudad de Huancayo presenta problemas de material particulado (PM_{2.5}) y dióxido de azufre (SO₂), supera los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Aire, es necesario realizar un inventario de emisiones de fuentes fijas para evaluar su incidencia en la contaminación atmosférica. El dióxido de azufre se produce en la combustión de carbón o petróleo que contengan cantidades de azufre importantes y estos combustibles también generan material particulado en la reacción de combustión usado por fuentes fijas y móviles. Las emisiones obtenidas en el modelo IVE son de 255.824,9 toneladas anuales, el dióxido de carbono se emite en mayor cantidad de 255.047,4 Tm/año representa el 99,70%, seguido de metano de 770,2 Tm/año representa el 0,3% y se emite en menor cantidad los óxidos nitrosos de 7,3 Tm/año representa el 0,3%. Los automóviles son los vehículos que emiten mayor cantidad de gases de efecto invernadero. El distrito de Huancayo conformada por 116.000 habitantes, solo existe 2 m² de áreas verdes por habitante y la ciudad adolece de una infraestructura vial. Actualmente existe un vehículo por cada 11 habitantes [11, 12].

4. CONCLUSIONES

Con respecto al Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE) es una herramienta que tiene por objetivo apoyar ciudades en el desarrollo de estimación de emisiones y fue diseñada para usar en países en vías de desarrollo, en el caso del Perú en trabajos anteriores se ha empleado en las estimaciones vehiculares de las ciudades de Cerro de Pasco y Lima.

La calidad de los resultados está determinada por los insumos y herramienta utilizada en la estimación del inventario, IVE define una distribución de potencia específica vehicular, lo que permite captar con precisión las condiciones de manejo en la zona de estudio, se ingresa tecnologías vehiculares, datos meteorológicos en condiciones de estudio y requiere de mayor información.

La Evaluación de Fuentes de Contaminación del Aire, Agua y Suelo presentada por la Organización Mundial de la Salud (OMS), es una guía sobre técnicas para el inventario rápido de fuentes para el control ambiental, por ser una guía de evaluación rápida requiere de menor cantidad de información y usa datos predeterminados, por ello se hacen aproximaciones involucrando una mayor incertidumbre en sus resultados.

La cantidad de gases de efecto invernadero emitidos al ambiente es de 255.824,9 toneladas anuales, el dióxido de carbono se emite en mayor cantidad de 255.047,4 Tm/año representa el 99,70%, seguido de metano de 770,2 Tm/año representa el 0.30% y se emite en menor cantidad los óxidos nitrosos de 7,3 Tm/año representa el 0003%. Los automóviles son los vehículos que emiten mayor cantidad de gases de efecto invernadero. El distrito de Huancayo conformada por 116.000 habitantes, solo existe 2m² de áreas verdes por habitante y la ciudad adolece de una infraestructura vial. Actualmente existe un vehículo por cada 11 habitantes.

REFERENCIAS

- [1] Caballero, M. (2011). Análisis de emisiones de vehículos livianos según ciclos de conducción específicos para la región Metropolitana. Trabajo de grado. Universidad de Chile.
- [2] CEPIS (1999). Curso de orientación para el control de la contaminación del aire, Manual de auto instrucción. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Organización Mundial de la salud. Lima.
- [3] Crean air Institute. (2013). La calidad del aire en América latina. Washington.
- [4] Lovera, D. et al. (2004). Modelo IVE: Metodología, mediciones y simulación de las emisiones de fuentes móviles en la ciudad de Lima. Revista del Instituto de Investigación 7(14), 92-99.
- [5] Economopoulos, A. (2002). Evaluación de fuentes de contaminación del aire. Serie de la tecnología ambiental de la OMS.
- [6] Hilario, N. (2017). Emisiones contaminantes de vehículos del distrito de Huancayo. Tesis de posgrado. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- [7] MINAM. (2014). Informe de monitoreo de la calidad del aire de la ciudad de Huancayo. Perú.
- [8] www.issrc.org/ive.
- [9] IPCC. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 3. Combustión Móvil. Módulo Energía.
- [10] Hilario, N. y Lovera, D. (2011). Estimación de emisiones contaminantes de las fuentes móviles en la ciudad minera de Pasco empleando el Modelo IVE. Revista del Instituto de Investigación 14(27), 34-45.
- [11] Rojas, P. (2015). Estimación de emisiones de contaminantes provenientes de fuentes móviles en la jurisdicción CAR. Tesis de posgrado. Universidad Nacional de Colombia.
- [12] SEMARNAT. (2009). Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Análisis al índice de riesgo generado en los humanos por la ingesta diaria de fluoruro

Luis Carlos Losada Benavides¹

Kelly Johana Meléndez Segura¹

Ángela Goretty García Gómez²

Jorge Bernardo Ramírez Zarta¹

¹Corporación Universitaria del Huila

²Universidad Surcolombiana
Colombia

La población del centro poblado el Juncal, jurisdicción del municipio de Palermo, situado al norte del departamento del Huila, Colombia, se abastece de aguas subterráneas para su sistema de acueducto, en donde se han reportado varios casos de fluorosis dental, además de altos niveles de fluoruros en el agua potable, lo cual ha generado preocupación entre los habitantes del sector por los riesgos que podrían tener; es por esta razón que el presente documento tuvo como objetivo principal, calcular el valor de la ingesta total promedio de fluoruros de esta población (0,6566 + 0,0127 mg/Kg/día), la cual se consiguió calculando la ingesta de líquidos de los habitantes del sector, además de tener en cuenta los valores teóricos de ingesta debida a pastas dentales, alimentos y suplementos, con el fin de calcular el índice de riesgo Hazard Quotation, en donde los resultados mostraron que la población presenta riesgo frente a los posibles efectos adversos a la salud debido a la ingesta de fluoruros, en al menos el 54% de los rangos de la población evaluada.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación natural por fluoruro en el agua subterránea se presenta en diversos países alrededor del mundo, llamando la atención por ser considerada una sustancia peligrosa [1] y por las posibles consecuencias para la salud que los fluoruros pueda traer [2], siendo la ingesta de agua con elevados niveles la principal vía de exposición a este elemento [3], además de esta vía, existen otras fuentes de exposición como son los alimentos [4, 5], productos dentales, e incluso el aire [6], lo cual aumenta la preocupación en la comunidad por la exposición a este ion y las posibles consecuencias en la salud que pueda conllevar.

La concentración y el grado de exposición de este elemento son variables muy importantes para determinar los potenciales efectos adversos asociados al consumo de fluoruros [5], donde es necesario establecer una ingesta diaria recomendada (IDR), ya que en el tracto gastrointestinal puede absorber alrededor del 97% y excreta tan solo el 50%, principalmente por vía urinaria [7], almacenándose el resto especialmente en huesos y dientes [6]. Esto puede causar efectos adversos, tales como fluorosis dental y ósea [8-10], problemas en los riñones [11-12], hígado [13], sistema nervioso [14], sistema endocrino [15,16] y reproductivo [17]. Además de estas complicaciones algunos investigadores reportan posibles afectaciones al desarrollo del cerebro humano, reduciendo, entre otros aspectos, el coeficiente intelectual (IQ) de los niños [4, 18], lo que deriva en la preocupación de los pobladores de El Juncal frente al posible riesgo por la ingesta de este elemento; toda vez, que se abastecen de aguas subterráneas mediante explotación de un pozo con profundidad total de 210 metros, y un caudal promedio de 1028,16 m³/día [19], cuyos reportes de fluoruros oscilaron entre 2,3 y 5,0 ppm [20-22] y los reportes de casos de fluorosis dental según el índice de Dean y el índice colectivo de fluorosis dental (IFC), presentan al Huila y al El Juncal en alto riesgo de fluorosis dental [23-25].

La dosis de referencia (RfD) se usa en las evaluaciones de riesgo como estimación de una exposición diaria de la población humana a la cual probablemente no se evidencie ningún efecto nocivo durante toda la vida [26]. Las dosis de referencia oral de Fluoruros corresponden a (0.06 mg/ Kg/ día) [6]; Tradicionalmente, las dosis de referencia se determinan basados en datos experimentales donde se evidencia a que concentración no se observa un nivel de efecto adverso (NOAEL) o un nivel de efecto adverso observado más bajo (LOAEL), en donde se dividen estos, por uno o más factores de incertidumbre con el fin de que la dosis de referencia proporcione la mayor seguridad posible [27].

Por otro lado, el índice de Hazard Quotation (HQ) es una relación determinística [28] que busca establecer un nivel seguro de exposición, ya que tiene en cuenta la cantidad de contaminante ingerido contra un nivel seguro de ingesta de este, por medio de la dosis de referencia; un valor de HQ menor a 1.0 indica que es poco probable incluso para poblaciones sensibles experimentar efectos adversos para la salud. Cuando el valor de HQ es mayor a 1.0, indica que el riesgo no cancerígeno excede el nivel aceptable y efectos de salud adversos son posibles [29].

De esta forma, el propósito de esta investigación es aportar los valores de ingesta diaria de fluoruros a los que se encuentran expuestos los moradores del centro poblado El Juncal, estimándose el consumo de líquidos percapita, y las concentraciones de este elemento, con el fin de contrastar este valor respecto a los valores de referencia (RfD) y poder estimar el riesgo en el que se encuentra la población por medio del índice de riesgo (HQ); adicionalmente se busca realizar un cálculo de la ingesta de fluoruro por consumo de alimentos, uso de pasta dental y consumo de suplementos según [27], para sensibilizar a la población y a los entes gubernamentales sobre los efectos nocivos que estos pueden desencadenar en un largo o corto periodo de tiempo, y se tomen medidas correctivas a esta problemática de salud ambiental que puedan llegar a presentarse en esta región.

2. MÉTODO

2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el centro poblado el Juncal, jurisdicción del municipio de Palermo, situado al norte del Departamento del Huila. Actualmente cuenta con 2.757 habitantes, los cuales se aprovisionan de agua principalmente por medio del acueducto de la población, el cual explota un pozo de agua subterránea (Figura 1).

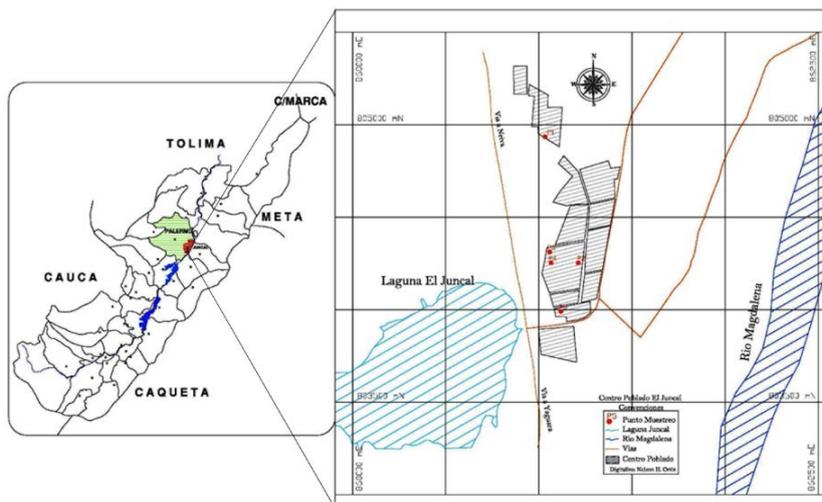


Figura 1. Área de estudio y puntos de muestreo de agua

2.2 Muestreo del agua

La metodología usada fue cuantitativa, transversal, donde se monitoreó la red de agua potable de la vereda mediante tomas puntuales ($n=90$), tomando un litro de agua en donde se determinó la concentración de fluoruro por un periodo de seis meses, realizándose muestreos por triplicado, una vez al mes y en tres tiempos diferentes durante el día seleccionado, los puntos escogidos para el muestreo fueron los mismos establecidos en los seguimientos históricos de la secretaría de salud departamental del Huila (Figura 1). Se recolectó un volumen de 1 litro por muestra.

2.3 Cuantificación del fluoruro

La cuantificación de fluoruros en las muestras, se llevó a cabo utilizando el método con electrodo de ion selectivo, previamente validado en el laboratorio de aguas de la Corporación Universitaria del Huila, en este método se utilizó un electrodo de ion selectivo marca Hanna de referencia HI 4010, siguiendo el protocolo establecido en [30].

2.4 Estimación de la ingesta de líquidos

Con el fin de determinar la ingesta de líquidos, se realizó la selección de la población mediante muestra aleatoria simple, determinando con un 95% de confianza la realización de 503 entrevistas, aplicando un cuestionario semiestructurado, previamente validado por pares y sometido en una prueba piloto.

2.5 Análisis de datos

La normalidad en la variable de la concentración del fluoruro, fue comprobada por medio de las pruebas de ANOVA y TUKEY, así como el análisis para cuantificar la ingesta de líquidos por género, rangos de peso y rangos de edades. La ingesta diaria de fluoruro se calculó mediante la ecuación (1), teniendo en cuenta la concentración promedio del ion en los meses de muestreo; para finalmente calcular el análisis de riesgo para sustancias no cancerígenas, por medio del Índice de Riesgo *Hazard Quotation* (ecuación (2)), siguiendo con los establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [30].

$$\text{Ingesta diaria de fluor} \left(\frac{\text{mg}}{\text{Kg}} \right) = \frac{\text{Conc.} \cdot \text{TI}}{\text{PC (Kg)}} \quad (1)$$

Donde:

Conc.: Concentración del contaminante en el agua; TI: Tasa de Ingesta diaria de agua; y PC: Peso Corporal.

$$\text{HQ} = \frac{\text{Ingesta diaria de Fluor}}{\text{Dosis de referencia}} \quad (2)$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Concentración de fluoruro en agua potable

Se evidenció, que todas las muestras de agua, contenían concentraciones de fluoruros ($1,610 \text{ ppm} \pm 0,06513$) las cuales sobrepasan el límite permitido por la norma colombiana de $1,0 \text{ ppm}$ [31], y la recomendación de la Organización mundial de la Salud [32]. Los valores en la concentración promedio mensual se pueden observar en la Figura 2. Por otro lado, durante el análisis estadístico no se encontró diferencia significativa entre las muestras recolectadas en un mismo día, además se realizó un análisis de varianza ANOVA de dos factores con varias muestras por grupo, entre los meses mayo y octubre, y puntos de medición 1, 2, 3, 4 y 5; los resultados indicaron que al menos en un mes el tamaño promedio de las concentraciones es distinto con el 95% de confianza.

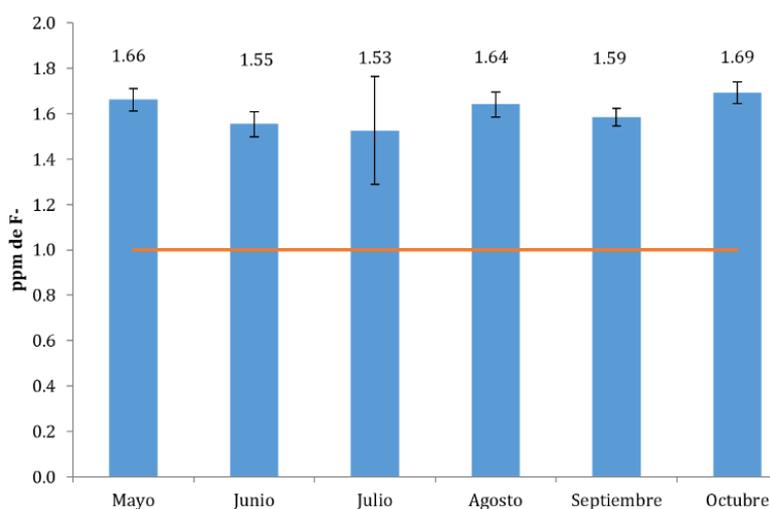


Figura 2. Concentración promedio mensual de fluoruro

3.2 Ingesta de líquidos

La ingesta total de líquidos para el género femenino obtuvo un valor promedio de $2,05 \text{ litros} \pm 0,685$, los detalles para cada grupo se pueden observar en la Tabla 1. Por su parte, el género masculino evidenció un valor promedio de $2,12 \text{ litros} \pm 0,718$, los valores para cada grupo se muestran en la Tabla 2. Al comparar los resultados en los dos géneros se encontró que no existe diferencia significativa entre la cantidad de líquidos ingeridos entre mujeres y hombres.

Tabla 1. Ingesta de líquidos total para el género Femenino en rangos de edad y peso

Edad	Peso											
	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75	76-80	81-85	86-90	+ 91
11-15	2,00	1,79	2,00	2,50								
16-20	2,25	1,65	1,95	1,65	2,00	1,69	1,75		1,50			
21-25	2,00	1,88	2,41	2,41	2,44	2,03	2,44	3,25	0,75		2,50	2,50
26-30		1,83	1,75	1,85	2,03	2,03	2,00	1,75				1,75
31-35		1,63	1,88	1,83	1,70	1,92	2,05	2,00				3,25
36-40		3,25	2,32	1,81	2,13	2,20	1,63	2,00	2,15	1,50	3,25	3,25
41-45			1,00	2,00	2,88	2,50	2,42	2,25	3,25		2,50	2,00
46-50		2,25	1,75	2,00	2,56	2,42	1,95	3,00	2,30	1,50	3,25	
51-55		1,50	1,38	1,75	2,75	1,85	2,17	3,25	2,75		1,50	2,25

Tabla 2. Ingesta de líquidos total en litros para el género Masculino en rango de edad y peso

Edad	Peso												
	31-35	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75	76-80	81-85	86-90	+ 91
11-15	2,00	1,75	1,70	1,42			1,75	2,25	2,00				
16-20				2,29		1,38	2,21	2,08	2,31	2,50	2,00		
21-25		2,00		0,50	2,58	2,33	1,81	2,22	1,00	2,50	1,63		
26-30			2,00	1,88	2,75	2,25		2,19	2,50	3,25	2,50	2,00	1,63
31-35					2,50	3,25	2,38	2,44		3,25	2,17	3,25	3,25
36-40				1,75			2,50	2,44		2,50		1,25	1,75
41-45					1,92		2,38	1,00	3,25	2,38	3,25	2,38	2,00
46-50						2,00	1,38	2,50	2,25	1,92	2,42		2,00
51-55					2,00	2,13		2,13	1,92		2,50	2,75	
56-60				2,00		1,75	1,38	2,25	1,75		1,75	1,75	2,25
61-65						1,94		0,88	2,00	2,00			2,25
66-70								1,80	2,88	1,75	3,25		1,00

3.3 Estimación diaria de ingesta de fluoruros debida a líquidos

Se calculó la dosis de exposición de la ingesta promedio en los seis meses de muestreo del agua potable para los habitantes del centro poblado el Juncal, para el género femenino (0,05345 mg/Kg/día ± 0,0167) y el género masculino (0,05077 mg/Kg/día + 0,0164), los valores para cada género se pueden observar en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3. Ingesta promedio de fluoruros debida a líquidos para el género femenino (mg/Kg/día)

Edad	Peso											
	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75	76-80	81-85	86-90	+ 91
11-15	0,083*	0,067*	0,067*	0,076*								
16-20	0,093*	0,062*	0,065*	0,050	0,056	0,043	0,041		0,031			
21-25	0,083*	0,070*	0,081*	0,073*	0,068*	0,052	0,058	0,072*	0,015		0,046	0,042
26-30		0,069*	0,059	0,056	0,056	0,052	0,047	0,039				0,030
31-35		0,061*	0,063*	0,056	0,047	0,049	0,049	0,044				0,055
36-40		0,122**	0,078*	0,055	0,059	0,056	0,038	0,044	0,044	0,029	0,059	0,055
41-45			0,034	0,061*	0,080*	0,064*	0,057	0,050	0,067*		0,046	0,034
46-50		0,084*	0,059	0,061*	0,071*	0,062*	0,046	0,066*	0,047	0,029	0,059	
51-55		0,056	0,046	0,053	0,076*	0,047	0,051	0,072*	0,057		0,027	0,038
56-60		0,037	0,055	0,046	0,056	0,047	0,039	0,033	0,036			
61-65				0,038		0,061*	0,059	0,030		0,048		0,030
66-70		0,047	0,050	0,067*	0,021	0,048	0,042	0,044		0,034	0,023	

*Sobrepasan la dosis de referencia RfD (6), **Sobrepasan el LOAEL [33]

Tabla 3. Ingesta promedio de fluoruros debida a líquidos para el género masculino (mg/Kg/día)

Edad	Peso												
	31-35	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75	76-80	81-85	86-90	+ 91
11-15	0,098*	0,074*	0,064*	0,048			0,042	0,053	0,044				
16-20				0,077*		0,038	0,053	0,049	0,051	0,052	0,037		
21-25		0,085*		0,017	0,078*	0,065*	0,044	0,053	0,022	0,052	0,030		
26-30			0,075*	0,063*	0,084*	0,062*		0,052	0,055	0,067*	0,046	0,037	0,028
31-35					0,076*	0,090*	0,057	0,058		0,067*	0,040	0,059	0,056
36-40				0,059			0,060	0,058		0,052		0,023	0,030
41-45					0,058		0,057	0,024	0,072*	0,049	0,060	0,043	0,035
46-50						0,056	0,033	0,059	0,050	0,040	0,045		0,035
51-55					0,061*	0,059		0,050	0,042		0,046	0,050	
56-60				0,067*		0,049	0,033	0,053	0,039		0,032	0,032	0,039
61-65						0,054		0,021	0,044	0,041			0,039
66-70								0,043	0,063*	0,036	0,060		0,017

*Sobrepasaron la dosis de referencia RfD [6]

3.4 Ingesta total de fluoruros

Con la intención de calcular la ingesta total de fluoruro en la población, se tuvieron en cuenta los valores teóricos de otras fuentes de flúor diferentes a los líquidos como los son; alimentos, pastas dentales y suplementos según (Tabla 5). De esta manera, junto con los valores calculados de ingesta de fluoruro debida a los líquidos, se calculó la ingesta total para la población de estudio (Tabla 6 y 7).

Tabla 5. Exposición estimada de fluoruro de fuentes no hídricas [27]

	Masculino (µg/Kg/día)			Femenino (µg/Kg/día)	
	13-19 años	20-49 años	+50 años	13-49 años	+50 años
Alimentos	9,7	11,4	10,2	10,7	10,2
Pasta dental	3,3	1,4	1,4	1,6	1,4
Suplementos	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 6. Ingesta total de fluoruro para el género femenino (mg/kg/día)

Edad	Peso											
	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75	76-80	81-85	86-90	+ 91
11-15	0,095*	0,079*	0,079*	0,088*								
16-20	0,105*	0,074*	0,078*	0,062*	0,068*	0,055	0,054		0,043			
21-25	0,095*	0,083*	0,093*	0,085*	0,080*	0,064*	0,070*	0,084*	0,028		0,058	0,055
26-30		0,081*	0,071*	0,068*	0,069*	0,064*	0,060	0,051				0,042
31-35		0,073*	0,075*	0,068*	0,059	0,061*	0,061*	0,056				0,067*
36-40		0,134**	0,090*	0,067*	0,071*	0,069*	0,051	0,056	0,057	0,041	0,072*	0,067*
41-45			0,046	0,073*	0,092*	0,076*	0,070*	0,062*	0,079*		0,058	0,046
46-50		0,084*	0,071*	0,073*	0,083*	0,074*	0,058	0,078*	0,060	0,041	0,072*	
51-55		0,068*	0,058	0,065*	0,088*	0,059	0,063*	0,083*	0,068*		0,039	0,050
56-60		0,049	0,066*	0,057	0,067*	0,058	0,051	0,045	0,048			
61-65				0,050		0,072*	0,071*	0,042		0,060		0,041
66-70		0,058	0,062*	0,078*	0,032	0,060	0,054	0,056		0,046	0,034	

*Sobrepasaron la dosis de referencia RfD (6), **Sobrepasaron el LOAEL [33]

Tabla 7. Ingesta total de fluoruro para el género masculino (mg/kg/día)

Edad	Peso												
	31-35	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75	76-80	81-85	86-90	+ 91
11-15	0,127**	0,104*	0,093*	0,077*			0,072*	0,083*	0,074*				
16-20				0,107*		0,068*	0,083*	0,079*	0,081*	0,081*	0,067*		
21-25		0,098*		0,030	0,091*	0,078*	0,056	0,065*	0,035	0,064*	0,043		
26-30			0,088*	0,076*	0,096*	0,075*		0,065*	0,068*	0,080*	0,059	0,049	0,041
31-35					0,089*	0,103*	0,070*	0,071*		0,080*	0,053	0,072*	0,069*
36-40				0,071*			0,073*	0,071*		0,064*		0,036	0,043
41-45					0,071*		0,070*	0,036	0,084*	0,062*	0,073*	0,056	0,047
46-50						0,068*	0,046	0,072*	0,062*	0,052	0,058		0,047
51-55					0,072*	0,071*		0,062*	0,054		0,058	0,062*	
56-60				0,079*		0,060	0,045	0,065*	0,050		0,044	0,044	0,051
61-65						0,065*		0,032	0,056	0,053			0,051
66-70								0,054	0,075*	0,048	0,072*		0,029

*Sobrepasaron la dosis de referencia RfD (6). **Sobrepasaron el LOAEL [33]

Como se puede apreciar en las Tablas 6 y 7, los valores de la ingesta total de fluoruros del género femenino, sobrepasaron la RfD en el 59% de los rangos establecidos en la investigación, a su vez el género masculino lo superó con el 63% de los suyos respectivamente.

3.5 Índice de riesgo HQ

Con los anteriores datos se realizó el cálculo del Índice de riesgo HQ. Las Tablas 8 y 9 muestran los diferentes valores calculados para la población de estudio. Los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov evidenciaron un comportamiento no paramétrico ($\leq 0,05$), y aplicando la prueba de Spearman los datos revelaron una correlación significativa y negativa al nivel 0,01, entre los valores de HQ y peso (-0,406) y HQ y edad (-0,555). Las Figuras 3 y 4 evidencian la tendencia de que a menor peso y menor edad se presenta mayor riesgo en la población, debido a la ingesta de fluoruros. Adicionalmente, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk a los resultados de HQ correlacionados a los diferentes rangos de edad y peso, el resultado de la prueba arrojó un comportamiento paramétrico ($\geq 0,05$), por lo tanto, se aplicó ANOVA, el cual evidenció diferencias significativas ($\leq 0,05$) entre los diferentes rangos de peso, edad y el índice de riesgo HQ. Por último, la prueba Tukey mostro que el HQ en los rangos de peso (36Kg-40Kg, 41Kg-45Kg y 36Kg-40Kg) son los que tienen diferencia significativa con más del 50% de los demás rangos de pesos; por otro lado, el HQ en el rango de edad entre 11 y 15 años, fue el único que evidencio diferencia significativa con más del 50% de los demás rangos de edad establecidos en la investigación.

Tabla 8. Índice de Riesgo (HQ) para el género femenino

Edad	Peso												
	31-35	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75	76-80	81-85	86-90	+ 91
11-15	1,4*	1,6*	1,3*	1,3*	1,5*								
16-20	1,6*	1,8*	1,2*	1,3*	1,0	1,1*	0,9	0,9		0,7			
21-25	1,4*	1,6*	1,4*	1,6*	1,4*	1,3*	1,1*	1,2*	1,4*	0,5		1,0	0,9
26-30			1,4*	1,2*	1,1*	1,2*	1,1*	1,0	0,9				0,7
31-35			1,2*	1,3*	1,1*	1,0	1,0	1,0	0,9				1,1*
36-40			2,2*	1,5*	1,1*	1,2*	1,2*	0,9	0,9	1,0	0,7	1,2*	0,8
41-45				0,8	1,2*	1,5*	1,3*	1,2*	1,0	1,3*		1,0	
46-50			1,4*	1,2*	1,2*	1,4*	1,2*	1,0	1,3*	1,0	0,7	1,2*	0,8
51-55			1,1*	1,0	1,1*	1,5*	1,0	1,1*	1,4*	1,1*		0,7	
56-60			0,8	1,1*	1,0	1,1*	1,0	0,9	0,8	0,8			
61-65					0,8		1,2*	1,2*	0,7		1,0		0,7
66-70			1,0	1,0	1,3*	0,5	1,0	0,9	0,9		0,8	0,6	

* Con posibles efectos adversos a la salud

Tabla 9. Índice de Riesgo (HQ) para el género masculino del Centro el poblado El Juncal

Edad	Peso												
	31-35	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75	76-80	81-85	86-90	+ 91
11-15	2,1*	1,7*	1,6*	1,3*			1,2*	1,4*	1,2*				
16-20				1,8*		1,1*	1,4*	1,3*	1,4*	1,4*	1,1*		
21-25		1,6*		0,5	1,5*	1,3*	0,9	1,1*	0,6	1,1*	0,7		
26-30			1,5*	1,3*	1,6*	1,3*		1,1*	1,1*	1,3*	1,0		
31-35					1,5*	1,7*	1,2*	1,2*		1,3*	0,9		
36-40				1,2*			1,2*	1,2*		1,1*			
41-45					1,2*		1,2*	0,6	1,4*	1,0	1,2*		
46-50			1,4*			1,1*	0,8	1,2*	1,0	0,9	1,0		
51-55			1,1*		1,2*	1,2*		1,0	0,9		1,0		
56-60			0,8	1,3*		1,0	0,8	1,1*	0,8		0,7		
61-65						1,1*		0,5	0,9	0,9			
66-70			1,0					0,9	1,3*	0,8	1,2*		

* Con posibles efectos adversos a la salud

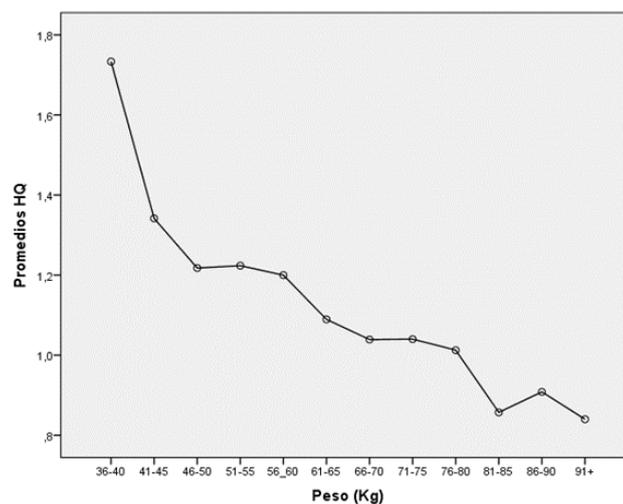


Figura 3. Valor del índice de riesgo (HQ) en los diferentes rangos de peso

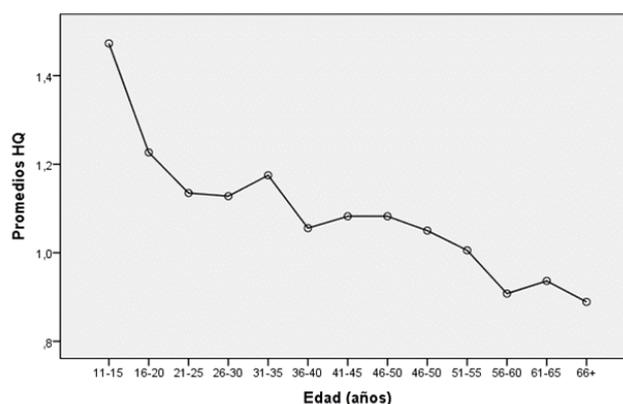


Figura 4. Valor del índice de riesgo (HQ) en los diferentes rangos de edad

Los resultados demuestran que el agua que se está distribuyendo en esta zona del Huila, presenta elevadas concentraciones de este ion; debido a que de las 90 muestras analizadas de la red de distribución de agua potable, todas sobrepasaron la recomendación de la Organización Mundial de la salud (OMS) y la normatividad colombiana (1 mg/L); estudios como el llevado a cabo por [12], evidenciaron que niveles mayores a 2,0 mg/L de fluoruros en el agua potable pueden causar daño a las funciones renales, pero no al Hígado en niños; aunque en el Centro poblado el Juncal no se alcanzaron niveles que sobrepasaran este valor, si se puede estimar que alrededor de 2.757 habitantes podrían estar en riesgo de presentar efectos en la salud, debido a que el consumo crónico de fluoruros provenientes de la fuente de agua potable, sobrepasan los niveles considerados como seguros para el consumo del líquido.

En lo que respecta a la evaluación de riesgo en la salud, se estimó en primera instancia la exposición mediante la ingesta de agua en litros para la población del centro poblado, la cual fluctuó entre 1,93 litros y 2,03 litros según la prueba T Student al 95% de confianza, además del peso de la población (31 Kg -91 Kg) y el rango de edad (11 años - 70 años). La concentración promedio de fluoruro en el agua fue de 1,61 ppm. Teniendo en cuenta los datos anteriores se pudo calcular el HQ, el cual arrojó que más del 50% de los rangos evaluados se encuentra en riesgo probable de presentar efectos en la salud adversos debido a la ingesta de fluoruros. De la misma manera las figuras 2 y 3 evidencian que, a menor edad y peso, el riesgo es mayor para población; sin embargo, es pertinente resaltar que el género femenino presenta un riesgo adicional, debido a que las mujeres en edad fértil pueden transferir de este ion al feto [34], o en otros casos pueden presentar una disminución de la fertilidad por la exposición a este compuesto [26].

La fluorosis esquelética es el efecto adverso a la salud más grave que se asocia claramente con la exposición prolongada a altos niveles de flúor en el agua potable. Haimanot, [35], señaló que la mayoría de las investigaciones epidemiológicas sugieren que se necesita una ingesta de al menos 8 mg/L durante 10 o más años para producir signos clínicos de las formas más leves de fluorosis esquelética, teniendo en cuenta lo anterior, los resultados de este estudio no evidencia que se supere dicha concentración en El Juncal, sin embargo no se puede descartar el riesgo debido a que el presente estudio solo evidenció el riesgo asociado durante seis meses; se recomienda seguir monitoreando el agua en la población.

Como se puede apreciar de estos resultados, la población de El Juncal se encuentra en riesgo por la ingesta crónica de fluoruros considerando de suma importancia que esta población y sus gobernantes conozca la magnitud del problema que representa el consumo de agua de la red y sus potenciales afectaciones, donde es fundamental que las autoridades

provean soluciones con métodos que permitan la defluoración del agua o con la construcción de otro sistema de purificación para esta comunidad, con el objetivo de no avanzar en el deterioro de la salud de sus moradores, especialmente la de niños y adolescentes, de igual forma se debe tomar otras medidas de prevención como el consumo de una baja ingesta de alimentos que contengan fluoruro, además de incrementar el uso de cremas dentales sin contenido de flúor.

4. CONCLUSIONES

La población femenina supero la dosis de referencias para fluoruro (RfD) por el consumo de líquidos en el 30.4 % de los rangos evaluados, este valor comparado con el 22.1 % del género masculino, evidencia un mayor riesgo para las mujeres de presentar un efecto nocivo derivado del consumo en líquidos de este ion.

La ingesta total promedio de fluoruro para la población de El Juncal, calculada a partir del consumo de alimentos, agua potable, ingesta de crema dental y suplementos, fue de $0,6566 + 0,0127$ mg/Kg/día, este valor representa riesgos con efectos adversos a la salud para al menos el 54,8 % en los diferentes rangos de la población evaluada; a su vez, los resultados evidencian que la el riesgo HQ aumenta en la población de menor edad y menor peso; constituyendo un preocupante situación que debe ser atendida por los sectores gubernamentales de la región huilense.

La metodología usada de análisis de riesgo, provee una importante aplicación en la toma de decisiones a nivel de políticas regionales; ya que evidencia que aunque se está cumpliendo con la herramienta descrita en la normatividad colombiana (IRCA), esto no es garantía que el agua se encuentre sin riesgo, toda vez que existen ciertos elementos que pueden estar presentes en los cuerpos de agua, y su continua exposición llegan a generar un riesgo para la salud de los pobladores que acceden a este servicio.

REFERENCIAS

- [1] Fawell, J. et al. (2006). Fluoride in drinking-water. IWA publishing.
- [2] Rukah, Y. y Alsokhny, K. (2004). Geochemical assessment of groundwater contamination with special emphasis on fluoride concentration, North Jordan. *Geochemistry*, 64(2), 171-181.
- [3] Yousefi, M., Ghoochani, M. y Mahvi, A. (2018). Health risk assessment to fluoride in drinking water of rural residents living in the Poldasht city, Northwest of Iran. *Ecotoxicology and environmental safety*, 148, 426-430.
- [4] Waugh, D. et al. (2016). Risk assessment of fluoride intake from tea in the Republic of Ireland and its implications for public health and water fluoridation. *International journal of environmental research and public health*, 13(3), 259-270.
- [5] Amalraj, A. y Pius, A. (2013). Health risk from fluoride exposure of a population in selected areas of Tamil Nadu South India. *Food Science and Human Wellness*, 2(2), 75-86.
- [6] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2003). Toxicological profile for fluorides, hydrogen fluoride, and fluorine. US Public Health Service.
- [7] Liu, H. et al. (2011). Urinary fluoride concentration in children with disabilities following long-term fluoride tablet ingestion. *Research in developmental disabilities*, 32(6), 2441-2448.
- [8] Shashi, A. Kumar, M. y Bhardwaj, M. (2008). Incidence of skeletal deformities in endemic fluorosis. *Tropical doctor*, 38(4), 231-233.
- [9] DenBesten, P. y Li, W. (2011). Chronic fluoride toxicity: dental fluorosis. *Fluoride and the oral environment*, 22, 81-96.
- [10] Dhar, V. y Bhatnagar, M. (2009). Physiology and toxicity of fluoride. *Indian Journal of Dental Research*, 20(3), 350-355.
- [11] Chandrajith, R. et al. (2011). Dose-dependent Na and Ca in fluoride-rich drinking water—another major cause of chronic renal failure in tropical arid regions. *Science of the total environment*, 409(4), 671-675.
- [12] Xiong, X. et al (2007). Dose-effect relationship between drinking water fluoride levels and damage to liver and kidney functions in children. *Environmental Research*, 103(1), 112-116.
- [13] Chattopadhyay, A. et al. (2011). Fluoride-induced histopathology and synthesis of stress protein in liver and kidney of mice. *Archives of toxicology*, 85(4), 327-335.
- [14] Valdez, L. et al. (2011). Effects of the fluoride on the central nervous system. *Neurología*, 26(5), 297-300.
- [15] García, E., Reyes, H. y Del Razo, L. (2009). Fluoride exposure impairs glucose tolerance via decreased insulin expression and oxidative stress. *Toxicology*, 263(2-3), 75-83.
- [16] Wang, H. et al. (2009). Fluoride-induced thyroid dysfunction in rats: roles of dietary protein and calcium level. *Toxicology and Industrial Health*, 25(1), 49-57.
- [17] Gupta, R. et al. (2007). The toxic effects of sodium fluoride on the reproductive system of male rats. *Toxicology and Industrial Health*, 23(9), 507-513.
- [18] Ortega, J. et al. (2006). Neurotóxicos medioambientales (IV). Tabaco, alcohol, solventes, flúor y aditivos alimentarios: Efectos adversos en el sistema nervioso fetal y posnatal y medidas preventivas. *Acta Pediátrica Española*, 64(10), 493-502.
- [19] Aguas del Huila. (2010). Manual de Operación-PTAP Vereda El Juncal Municipio de Palermo. Neiva.
- [20] Misnaza, S. (2014). Vigilancia centinela de la exposición a flúor. Resultados del primer año de implementación, Colombia, 2012-2013. Informe quincenal epidemiológico nacional, 19(10), 149-161.
- [21] Montañas, M. (2008). Guía de fluorosis dental, normas técnicas de la fluorosis dental. Secretaria de salud departamental. Gobernación del Huila.
- [22] Misnaza, S. y Tovar, S. (2017). Áreas de riesgo por exposición a flúor, Colombia 2012-2015. Informe quincenal epidemiológico nacional, 22(15), 230-244.
- [23] Ramos, M. (2014). Concentración del flúor en la orina de los niños de 6 a 12 años que presentan fluorosis dental severa en el centro poblado el Juncal, municipio de Palermo-Huila. Universidad Antonio Nariño.

- [24] Rojas, C. y Sierra, E. (2014). Concentración de flúor en la orina de los niños que presentan fluorosis dental severa en el centro poblado el Juncal, municipio de Palermo-Huila. Universidad Antonio Nariño.
- [25] Ardila, C. y Cerquera, M. (2013). Fluorosis dental y su asociación con la pérdida de densidad ósea en niños de 6 a 16 años de edad, del corregimiento el Juncal del municipio de Palermo. Universidad Antonio Nariño.
- [26] Mirzabeygi, M. et al. (2018). The concentration data of fluoride and health risk assessment in drinking water in the Ardakan city of Yazd province, Iran. *Data in brief*, 18, 40-46.
- [27] National Research Council. (2006). Fluoride in drinking water: a scientific review of EPA's standards. The National Academies Press.
- [28] Wang, Z. et al. (2019). Critical review and probabilistic health hazard assessment of cleaning product ingredients in all-purpose cleaners, dish care products, and laundry care products. *Environment international*, 125, 399-417.
- [29] Environmental Protection Agency. (2008). Fluoride: Dose-response analysis for non-cancer effects dental fluorosis: Evaluations of key studies health and ecological criteria division office of water. USA.
- [30] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, & Water Environment Federation. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. USA.
- [31] Ministerio de la protección social y ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2007). Resolución Número 2115 Del 2007. Diario oficial de Colombia.
- [32] World Health Organization. (2010). Inadequate or excess fluoride: A major public health concern. Recuperado: <https://www.who.int/ipcs/features/fluoride.pdf?ua=1>.
- [33] The US Environmental Protection Agency. (2012). Iris Fluorine (Soluble Fluoride) (CASRN 7782-41-4). Recuperado: https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0053_summary.pdf
- [34] Freni, S. (1994). Exposure to high fluoride concentrations in drinking water is associated with decreased birth rates. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A Current Issues*, 42(1), 109-121.
- [35] Haimanot, R. (1990). Neurological complications of endemic skeletal fluorosis, with special emphasis on radiculo-myelopathy. *Spinal Cord*, 28(4), 244-251.

Una mirada a las tecnologías emergentes para mitigar los efectos del cambio climático en la agricultura

Ricardo Andrés Fonseca Perdomo
Daniel Felipe Peñarete Moreno
Julio Faenz Ruiz González
Universitaria Agustiniana
Colombia

En tan solo 10 años la humanidad tendrá que enfrentarse a las consecuencias del modelo económico global, en una década, se obtendrán los resultados de las decisiones y acciones que tomen desde ya, para dar frente a los retos que se esperan para el 2050. La Organización para la Agricultura y Alimentación (FAO) han afirmado que en 30 años el mundo tal cual como se viene moviendo, se verá expuesto a los climas más extremos y las necesidades alimentarias jamás antes vistas, pues se espera que el crecimiento poblacional mundial sea del 70% para estos años y por tanto, el sector agroeconómico se verá obligado a transformar su modelo de producción, para lograr un aumento de más del 50% de lo que se produce en la actualidad; teniendo en cuenta que la curva de crecimiento éste sector ha sido desfavorable en los últimos años, se debe replantear las técnicas de producción, tanto en estrategias y modelos como en herramientas tecnológicas, especialmente centradas en la adaptación de cultivos y ganados resistentes los climas extremos, el uso óptimo de los recursos naturales y los agroquímicos, y la reducción de los Gases Efecto Invernadero (GEI) que son resultado del consumo y pérdida de los alimentos. En este trabajo se realiza una revisión exhaustiva del panorama mundial y el cambio climático, la producción agroeconómica mundial, la macro visión en Latinoamérica y Colombia (según el último censo nacional agropecuario), y las estrategias y herramientas tecnológicas propuestas para mitigar las afectaciones del sector agricultor, en los últimos años.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mundo se ha empezado a enfrentar a los diversos problemas que se prevén para el futuro, entre ellas las crisis alimentarias y ambientales por esto, la Organización para la Agricultura y Alimentación (FAO) ha propuesto 3 objetivos principales a ser cumplidos para el 2050: La seguridad alimentaria, la degradación ambiental y el cambio climático. Respecto a este último el cual es resultado de la degradación ambiental, atribuida principalmente a las grandes industrias, que, desde la antigüedad no han prestado atención al deterioro de ambiental, por ello el clima ha variado de forma drástica afectando los procesos agropecuarios en el mundo entero y afectando el compromiso con la seguridad alimentaria.

Partiendo del hecho de que del sector agropecuario aporta un porcentaje importante para la alimentación mundial, Según la (FAO) entre el 2012 y 2050, la producción agrícola y agropecuaria deberá aumentar un 50% para suplir la demanda de aproximadamente 9.800 millones de personas. La producción de cereales, principal insumo de los alimentos consumidos en el mundo, tendrá que pasar de una producción actual de 1.900 millones de toneladas anuales a 3.800 para el 2050. Desde 1997 hasta el 2015 el aumento de la demanda agregada y la producción en % anual a nivel mundial llegó al 2.0, se estima que para el 2030 aumente en 1.4. [1].

La seguridad alimentaria no es la única preocupación mundial sobre la producción del sector agroeconómico, también el índice de la población rural y su estado económico frente a los índices de pobreza, por ello los miembros de las Naciones Unidas aprobaron en el 2015 la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible que incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que busca darles frente a los desafíos de la pobreza el hambre y la malnutrición, contemplando también el cambio climático como principal obstáculo. La inversión en el sector agricultor puede garantizar el cumplimiento de los 17 ODS, fortaleciendo las estrategias que promuevan la gestión sostenible en los recursos naturales, incluyendo la biodiversidad, la pesca, los bosques, el uso de los suelos y tierras de cultivo, la gerencia del uso de agua, el cuidado de los océanos, y por supuesto, la reducción de los efectos negativos que afectan el cambio climático, procurando generar tácticas adaptativas a este último tópico [2].

2. MÉTODO

Se realiza una búsqueda inicial sobre el panorama mundial y las proyecciones climáticas que se esperan para los siguientes años y su afectación en la producción de alimentos, especialmente en el sector de la agricultura, esta búsqueda se realiza utilizando la base de datos *Scopus* y limitando los artículos a la palabra clave *Agriculture AND change climate* además de restringir entre los años 2015 a 2020 y por último filtrando los artículos más citados. Seguido a esto, se realiza una segunda búsqueda que permita esclarecer el panorama en latino américa desde una macro visión de la agricultura, para enfoca con mayor detalle el resultado en Colombia, se hizo uso del Censo Nacional Agropecuario CNA del 2016, último publicado en el país, para establecer de forma concreta la situación del municipio de Cundinamarca en el sector agricultor.

Evidenciando el horizonte de la agricultura y el cambio climático, así como las características productivas en Cundinamarca, se realiza una última búsqueda bibliométrica, basada inicialmente en el resultado de un análisis de concurrencia, donde la red bibliométrica está definida por nodos y enlaces que representan las diferentes

clasificaciones de publicaciones, como revistas, autores y/o palabras claves, la relación entre nodos se ve representada por líneas que representa la co-citación, el acoplamiento bibliográfico y las citas directas [3]. Utilizando esta herramienta y basados en la relación de publicaciones más citadas entre los años 2015 a 2020, se presenta un mapa de concurrencia basado en las palabras claves *Agriculture* y *Change Climate* para así establecer, por último, una síntesis de artículos que proponen tecnologías para mitigar las afectaciones del cambio climático en las tierras de cultivos.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 El cambio climático en el mundo

El grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) han establecido en su quinto informe de evaluación, que el cambio climático, soportado por la emisión y concentración de los gases de efecto invernadero, han sido especialmente por el desarrollo socioeconómico como también por las políticas climáticas de los países del mundo. Esto conlleva a que las olas de calor sean más duraderas con el paso de los años y de igual forma, las precipitaciones serán más extremas y frecuentes al año. Se estima que para el año 2050, la temperatura media global llegue a los 34.1 °C y para el año 2100 sea de hasta 39 °C, si no se empiezan a reducir las concentraciones y emisiones de CO₂, en la próxima década se tendría que llegar a emisiones cero. Para ello es importante mantener los límites del calentamiento global a niveles inferiores al 2 °C. Por lo cual proponen estrategias de innovación e inversión tecnológica relacionadas con la infraestructura ecológica, la alimentación y la vida sostenible [4].

Nullis [5], esclarece que en el informe número 6 del IPCC, se ha determinado que el calentamiento global debe ser menor a 1.5 °C, que implican realizar cambios jamás contemplados en los diferentes estudios y políticas; requeriría de transiciones sin precedentes en todos los aspectos de la sociedad e insiste en los enormes beneficios que revertirían en la salud, en los ecosistemas y en el desarrollo de una economía sostenible frente a un aumento de 2 °C o más indica Nullis por parte de la oficina de comunicaciones y relaciones públicas de la Organización Mundial de Metrología (OMM). También indica que, para frenar el aumento de la temperatura media mundial, según las leyes físicas, el mundo debe disminuir en un 45% las emisiones del CO₂ y llegar a cero emisiones para el 2050, de lo contrario entre 2030 y 2052 se alcanzaría un aumento mayor a 1.5 °C y para el 2100 entre 3 a 4 °C como se observa en la Figura 1, donde el mejor panorama es el que muestra la curva de color azul, con una probabilidad de estar en promedio, por debajo del aumento de 1.5 °C, mientras que la curva de color morado establece una distribución de la probabilidad del 50% de llegar incluso al aumento de 2 °C.

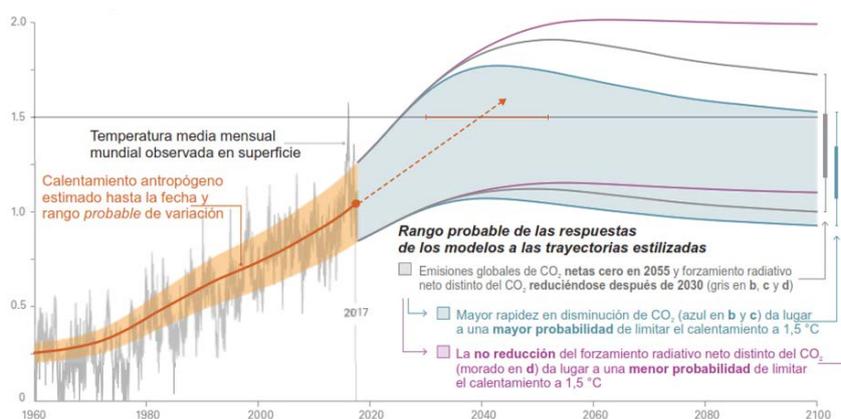


Figura 1. Proyección del aumento de la temperatura media global desde 1960 a 2100 [5]

Una mirada importante sobre la cadena de la Producción y Consumo de Alimentos (*Loss y Waste Food FLW*) es la pérdida y desperdicio de éstos, destinados al consumo humano, que afectan de forma directa a la emisión de Gases Efecto Invernadero (GEI), por ejemplo, entre 1961 a 2011 se identificó un aumento del 44% en el promedio mundial de emisiones FLW de 225 kg de CO₂ a 323 Kg en 2011[6]. Por ello, entre las estrategias necesarias para mitigar el impacto climático, es que para el 2050 las energías renovables suministren un poco más del 50% de la demanda energética mundial, se disminuya el consumo del carbón del 1% actual al 7% y se establezcan reformas en el sector de la alimentación, transporte y se normalice la gestión de la tierra con una agricultura sostenible, solidaria con la gerencia del agua, el uso de los suelos, la forestación y reforestación, y la bioenergía, para así garantizar los sistemas alimentarios, la biodiversidad y las funciones y servicios propias de los ecosistemas [7].

3.2 Macro visión del sector agrícola en Latinoamérica

El sector agrícola de América latina, será de los más golpeados por el cambio climático y sus efectos sobre su normal ejercicio, poniendo en peligro la seguridad alimentaria. Aunque el sector es de los que menos aporta al Producto Interno Bruto (PIB) de algunos países, pero para el 2010 más de 2600 millones de personas en el mundo dependen

económicamente de la agricultura, pues cerca del 40% del territorio total del mundo, es ocupado para fines de producción de alimentos, un 30% (1.500 millones de hectáreas) destinado para la plantación de cultivos y un 70% (3.500 millones de hectáreas) para pastoreo. En los países Latinoamericanos, entre 1965 – 2013, su aporte al PIB (En promedio 4.000 mil dólares per capital) fue del 10%, en estos países en promedio el aumento del PIB per capital fue de 1.000 dólares dando como resultado una caída de 0.11 puntos en el aporte del sector agrícola y pecuario. Este fenómeno se acuña a diferentes factores, como el sistema gubernamental y su apoyo al sector, el deceso de la actividad campesina de los microempresarios agrícolas, las guerras internas de algunos países, entre otras; pero el cambio climático juega un papel crucial para este sector, llevando a suponer mediante modelos matemáticos ricardianos, que el sector en los próximos años será afectado de forma negativa, entre un 4% a 8%, teniendo en cuenta la adaptación de estrategias para darle frente a los efectos climáticos venideros, pero aquellos agricultores que no adapten estas técnicas, podrían llegar a tener efectos negativos de hasta un 18% [8].

Un estudio hecho sobre el cambio climático y su impacto en Latinoamérica, establece que el aumento de GEI provocado especialmente por la concentración del CO₂, provoca un aumento en la temperatura media global, afectando los cultivos en diferentes aspectos, tales como:

- Reduciendo su duración y resistencia
- Aumentando las tasas de respiración de los cultivos
- Afectando la supervivencia y distribución de plagas
- Acelerando la mineralización de nutrientes en los díselos
- Disminución de la eficiencia de los fertilizantes.
- Aumento en la evapotranspiración.

De igual forma los recursos hídricos, que para la actualidad ya empiezan a ser escasos, se verán sometidos a un mayor estrés. Frente a estas preocupaciones, se suma la deficiente adaptación de Latinoamérica para enfrentar los desafíos afectando principalmente la producción de cereales como el trigo, el arroz y otros cultivos agroecológicos. Por ello, algunas propuestas para mejorar la respuesta, asegurando así la necesidad de producción ascendente de alimentos para los años venideros, son mejoras tecnológicas que permitan la conservación de la agricultura mediante técnicas de clima inteligente, el uso eficiente y consiente del agua, creación de cultivos resistentes al estrés y sistemas predictivos para cambios climáticos, que permitan antelar y actuar frente a las variaciones extremas de climas [9].

3.3 Estadísticas en Colombia del Censo Nacional Agropecuario 2016

En Colombia, el 38.6% del territorio nacional está dispuesto con fines de producción agropecuario, donde vive alrededor de 2.7 millones de productores. Cabe destacar que, el 45.7% de la población rural con actividades agropecuarias, vive en condición de pobreza [10]. Para el 2018, el sector agrícola aportó el 9% del PIB y durante los últimos 10 años no ha superado más del 12% [11]. El cambio climático y la baja asistencia especializada en el sector agrícola, hacen que los procesos productivos agrícolas en el país se enfrenten a diversas variables que, al no ser atendidas de forma oportuna, afectan el normal desarrollo de las cosechas, entre ellos la irrigación, ya que esta es vital para obtener un buen producto y así mismo un número satisfactorio de retorno en cantidad cosechada. Cabe anotar que la eficiencia de irrigación no solo potencia el resultado de los cultivos, sino que también aporta al mejoramiento del impacto ambiental con un uso eficiente del agua [12].

El departamento colombiano Cundinamarca tiene un área aproximado de 26.300 Km² en todo su terreno y, está delimitado al norte por Puerto salgar y Yacopi, al oriente por Medina y Paratebueno, al occidente por Girardot y Ricaurte, y al sur por Venecia y Cabrera. La capital de Colombia, Bogotá, está ubicada en este departamento, y alrededor de ella se encuentran algunos municipios, que en conjunto han sido denominados como la Sabana de Bogotá que tiene un área aproximada de 2.500 Km² en todo su terreno. Lo que representa el 9.5% del territorio de Cundinamarca. La Sabana de Bogotá está delimitada el norte por el municipio de Villapinzón y Ubaté, por el oriente La Calera, Guasca y Sesquilé, por el occidente Zipacón y Facatativá, y por el sur Soacha y Sibaté.

Según el CNA del 2016 realizado por el Departamento Administrativo Nacional Estadístico DANE, Colombia tiene un total de 111.5 millones de hectáreas con propósito rural, del cual el 38.6% (43'039.000 Ha) son destinadas a producción agropecuaria, del cual el 19.7% (8'500.000 ha) son de uso agrícola. Cundinamarca tiene un total de 1'389.940 ha de tierra destinadas a uso agropecuario, lo que representa el 3.3% del territorio nacional con este fin. A su vez, Cundinamarca utiliza 466.534 ha para cultivos agrícolas, lo que representa el 5% del área destinada a usos agrícolas, de los cuales 191.492 ha, para el 2016, estaban siendo usadas para cultivos activos, lo que indica que, del área total destinada para usos agrícolas, tan solo el 41% estaban activas. De forma general, en 2016, Cundinamarca tenía tan solo el 2% del total de área destinada a fines agrícolas en Colombia, con cultivos activos, el restante de extensión, se encontraban destinados a descanso y barbecho [10].

Las Unidades de Producción Agropecuaria UPA, se pueden clasificar según la propiedad de la tierra, según CNA del DANE 2016, en la que se observa la distribución.

Tabla 1. Participación en % y Ha de extensión en las diferentes tendencias de propiedad y uso de las tierras agropecuarias

Propia	Arriendo	Aparcería	Propiedad colectiva	Mixta	Otras
985467,46 ha	200151,36 ha	19459,16 ha	15289,34 ha	88956,16 ha	82006,46 ha
70,90%	14,40%	1,40%	1,10%	6,40%	5,90%

De manera análoga, se puede aproximar el valor de participación de las tierras propias con fines agrícolas con cultivos activos en Cundinamarca, que sería un total de 19.709 ha, de uso agrícola en Cundinamarca, son propias.

3.4 Tipo de riego utilizado en las Unidades de Producción Agropecuaria UPA

En Colombia el 33.3% de las UPA utilizan algún tipo de sistema para el riego de los cultivos. En un Cundinamarca existe un total de 57.241 UPAs (5,9% del total de UPAs del país que son 957.597), de estas tan solo 17.204 (30.1% de las UPA en Cundinamarca) utilizan algún sistema de riego para sus procesos agropecuarios. En la figura 2 se observa el número de UPA que tienen.

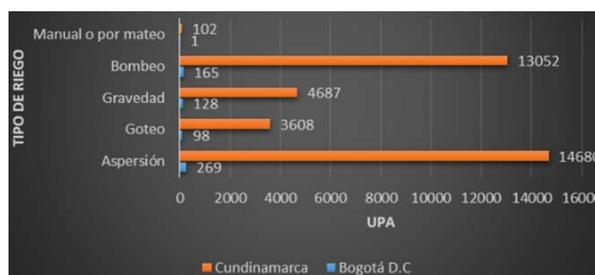


Figura 2. Número de UPA por clasificación de tipo de riego

En Cundinamarca, 27.732 UPA usan riego por bombeo o aspersión, lo que indica que el 76.8% de las UPA tienen tecnificación de algún tipo para sus procesos agropecuarios, mientras que 8.397 (23.2%) utilizan métodos que no tiene control y que debido a la irregularidad de los terrenos no son eficientes para los procesos agropecuarios, especialmente agrícolas. En todo el territorio nacional rural, las UPA que tienen maquinaria del algún tipo para la cosecha, pos cosecha, preparación y siembra y manejo de los cultivos, tan solo representan el 16.4% de todas las UPA censadas. En Cundinamarca existen 27.098 UPA con maquinaria para procesos agrícolas, que representa el 7.7% del total de UPA del país, de éstas, 20.081 cuentan con sistemas para el manejo de los cultivos para mejoras.

El número de UPA en Cundinamarca, que reciben asistencia técnica, de las 252.907 UPA reciben asistencia técnica tan solo el 9.1% (23.099 Unidades) y el 90.9% (223.808 Unidades) no reciben asistencia de ningún tipo, de otra manera en Cundinamarca, el número de UPA que reciben asistencia representa tan solo el 0.9% del total de UPA del País, que de manera general es 16.5% con asistencia contra un 83.5% sin asistencia en todo el territorio nacional. Del total de UPAs que reciben asistencia técnica el 83% participan de capacitaciones en *Buenas prácticas agrícolas* y tan solo el 5% reciben capacitaciones y ayudas tecnológicas en el *Manejo de Suelos*.

3.5 Protección de los recursos naturales: el agua

Del total de UPA de Cundinamarca, que son 252.907 el 43.3% (109.535 UPA) protegen de mediante alguna técnica de buenas prácticas de producción agrícola, las fuentes naturales de agua, el 15.5% no realizan estas prácticas para garantizar el buen uso hídrico, y el restante 41.2% de las UPA, no tienen acceso a fuentes naturales de agua. En la Figura 3 se observa el número de UPA que realizan algún tipo de actividad para proteger el recurso del agua, el porcentaje que se muestra, está relacionado con el total de UPA en Cundinamarca, es decir que el 36% del total de UPA censadas en Cundinamarca, utilizan la conservación de la vegetación como técnica para proteger las fuentes naturales de agua.

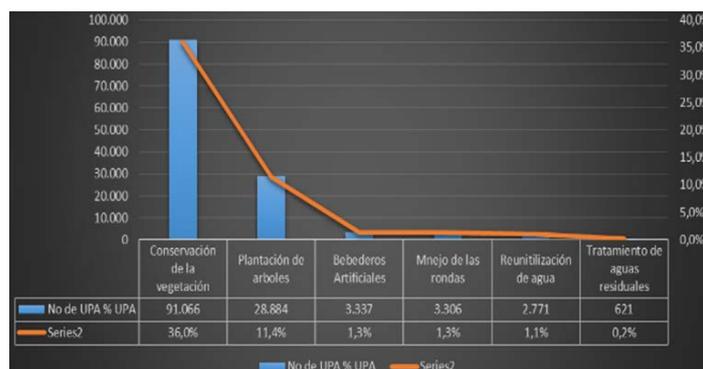


Figura 3. Número de UPA por tipo de práctica para la protección de fuentes de agua

3.6 Dificultadas en el uso del agua de la actividad agropecuaria

En Colombia el 54.7% de las UPA presentan dificultad para el aprovechamiento del agua en su actividad, de lo cual el 61.4% es por sequias, el 24.2% por falta de infraestructura y el 6.6% por la contaminación. En Cundinamarca 118.641 UPA tienen dificultad en el uso del agua en su actividad agropecuaria, mientras que 126.132 no la tienen. Principalmente 76.116 UPA en Cundinamarca tienen afectaciones por las sequias, seguido de 28.553 que no pueden hacer uso hídrico debido a la falta de infraestructura (Figura 4).

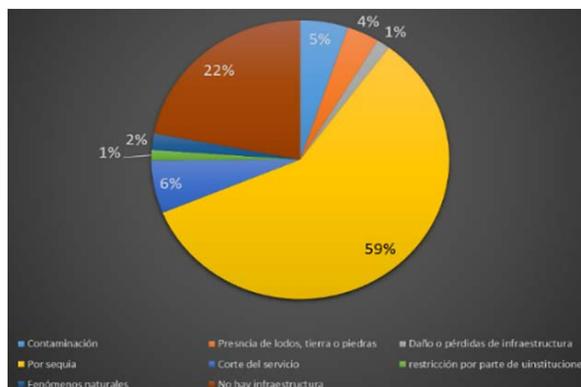


Figura 4. Porcentaje de UPA en Cundinamarca por tipo de afectación en el uso del Agua

3.7 Cultivos agroindustriales en Colombia

De los cultivos agroindustriales más representativos de Cundinamarca, es la caña panelera con un total de 40.128 hectáreas sembradas, lo que representa el 43% del total de hectáreas sembradas, y el café con 33.680 hectáreas, representando el 36% (Tabla 3).

Tabla 2. Hectáreas más representativas de los cultivos sembrados en Cundinamarca

Total de hectáreas	Cultivos Agroindustriales		Tubérculos y plátanos		Frutas		Cereales		Verduras	
	Café	Caña panelera	Plátano	Papa	Banano común	Cítricos	Maíz amarillo	Maíz blanco	Frijol	Tomate
235.741	33.680	40.218	12.173	83.555	13.742	8.674	26.953	13.239	1.523	1.984
	14%	17%	5%	35%	6%	4%	11%	6%	1%	1%

En Cundinamarca, de los cultivos de siembra más representativos entre los diferentes grandes grupos son: En el grupo de tubérculos y plátanos está la papa con un 35% (83.555 Hectáreas sembradas), en el grupo de los cultivos agroindustriales está la caña panelera con un 17% (40.218 hectáreas sembradas) y el café con un 14% (33.680 hectáreas sembradas), y en el grupo de los cereales, está el maíz amarillo con un 11% (26.953 hectáreas sembradas) (Figura 5).

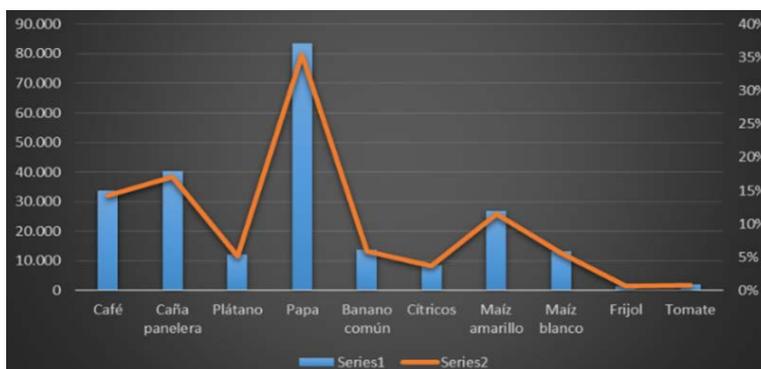


Figura 5. Cultivos por hectáreas más representativos en Cundinamarca

3.8 Panorama climático para Colombia

Para el país, el futuro de las condiciones climáticas no es alentador, teniendo en cuenta la transición que vive el mundo, Colombia se verá afectado principalmente por la escasez de las fuentes hídricas y la inestabilidad de los suelos, también se prevén inundaciones para las áreas costeras por el aumento del nivel del mar, resaltando que no solo será en Colombia sino en todo sur América. Debido al fenómeno de la niña, en 2011 Colombia se enfrentó a los climas más extremos registrados en los últimos 50 años, afectando a 28 departamentos, más específicamente en Cundinamarca se registró un aumento de la temperatura de más de 0.5 °C y una disminución en la precipitación de 60%.

Para el periodo del 2011 al 2100, se espera que en 99.9% del territorio nacional, la temperatura media aumente en 2 °C, con alta probabilidad de aumentar 1.4 °C en los siguientes 20 años y alcanzando un máximo de +3.4 °C para el 2100. En cuanto a las precipitaciones, el 78% del territorio nacional tendrá variaciones entre ±10%, teniendo en cuenta que la distribución de la probabilidad es de -30 a -10%, lo que significa la disminución de lluvias en el país de hasta el 15% para las siguientes dos décadas, teniendo al final de este periodo pérdidas mayores a -4.0mm/año en el 20% del territorio. Con esto, se espera que la disminución del 23.74% del sector agrícola del país, siendo afectado por la intensificación de lluvias (Efecto del niño) y la disminución de las mismas (Efecto de la niña), especialmente el sector caficultor, será afectado por la falta hídrica, en un 50% del total cultivado [13].

Un estudio realizado en Cundinamarca [14], sobre los cultivos principales en el departamento y sus afectaciones estimadas para el futuro, centrado en productos agrícolas como la papa pastusa y suprema (producción de 1'031.000 Ton en 2013), la caña panelera (Producción: 182.451 Ton en 2013) y el maíz tradicional (Producción: 64.426 Ton en 2013), revela las pérdidas de tierras óptimas para los diferentes cultivos estudiados, frente a dos panoramas para el futuro del clima, donde A2 muestra el panorama pesimista frente al incremento de la temperatura media global en más de 2 °C y B2 que presenta el panorama optimista, los resultados se muestran en la Figura6.

CULTIVO	ACTUAL	A2		B2	
		2011 - 2040	2070 - 2100	2011 - 2040	2070 - 2100
Arroz	242.036,16	296.119,95	297.225,54	300.878,74	307.867,00
Arveja	233.506,66	0,00	0,00	0,00	0,00
Caña	285.121,53	150.977,01	267.112,21	148.498,56	252.448,16
Criolla	560.915,53	0,00	400.117,39	0,00	461.238,63
Frijol	591.660,56	11.295,15	944.392,12	12.876,70	974.882,77
Maíz	465.320,42	42.207,69	658.252,05	50.280,60	597.208,84
Papa	80.366,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Plátano	402.240,05	172.984,81	507.319,50	160.444,93	497.776,30
Yuca	287.669,34	129.903,22	219.202,22	127.481,50	195.379,86
TOTAL	3.148.836,72	803.487,84	3.293.621,03	800.461,03	3.286.801,57

A2 (escenarios pesimistas), B2 (escenarios optimistas), IPCC (2007). Fuente: los autores

Perdida leve  Pérdida media  Pérdida fuerte 

Figura 6. Área óptima (ha) para el desarrollo de cada cultivo en los escenarios A2 y B2 [14]

Es motivo de preocupación la curva de producción de los cultivos de papa común, la papa criolla y la arveja, pues según el estudio [14], el área destinada para producir estos alimentos para los años 2011-2040 y 2070 a 2100, será de 0 hectáreas en los escenarios pesimistas y optimistas. La papa en especial, es uno de los cultivos más representativos de Cundinamarca con más de 83.000 hectáreas cultivadas en 2016 según el CNA del DANE, pero a su vez es un cultivo propenso a sufrir los problemas del cambio climático [14]:

Los cultivos con bajos requerimientos de precipitación y temperatura como la arveja y la papa pastusa desaparecerían en el futuro, ya que estas dos variables climáticas tienden a presentar valores superiores a los actuales bajo cualquiera de los escenarios climáticos, la papa es una de las especies de plantas más sensibles al estrés hídrico, pues el exceso de agua en el suelo, provoca un desarrollo pobre de las raíces de la papa y la pudrición de los tubérculos recién formados.

De manera general, la perspectiva futura de los 9 cultivos estudiados en Cundinamarca, para el primer periodo 2011 – 2040, que tan solo es en 10 años, muestra para el escenario A2 y B2 una reducción del 74.5% del área óptima. El modelo también sugiere que algunos cultivos más resistentes a las diferentes condiciones climáticas podrán experimentar crecimiento para el segundo periodo estudiado 2070-2100, como lo es el caso del arroz (26,8% de crecimiento), el frijol (64,8% de crecimiento), el maíz (28,3% de crecimiento) y el plátano (23,8% de crecimiento), este estimado para el escenario B2.

3.9 Análisis de concurrencia sobre agricultura

Teniendo en cuenta la evidente necesidad de intensificar los esfuerzos para mejorar y tecnificar los procesos de producción de alimentos, especialmente en el sector de la agricultura, este apartado busca presentar las temáticas generales de investigación en el mundo a cerca de la agricultura, por ello se realizó una búsqueda en la base de datos SCOPUS con la palabra clave *Agriculture* entre el 2016 al 2020, para verificar cuales son las palabras claves más utilizadas alrededor de ésta temática central, de los 2.000 artículos más citados, se obtuvo un mapa de concurrencia que se puede observar en la Figura7.

En el mapa de concurrencia se observan grandes grupos ligados a la palabra clave central, entre ellos se pueden identificar y generalizar los siguientes temas como se muestra en la Figura 8.

El grupo más representativo de palabras claves, se ve ligado de forma cercana a la palabra *Cambio Climático* (Grupo rojo), por ello se realiza una segunda búsqueda para establecer las temáticas centrales que abarcan estos dos temas, utilizando la siguiente ecuación de búsqueda: TITLE-ABS-KEY (change climate AND agriculture) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016)). Tomando los 2.000 artículos más citados se obtiene el siguiente mapa.

3.10 Tecnologías contra el cambio climático en la agricultura

Con objeto de identificar cuáles han sido hasta el momento los avances tecnológicos, en materia de ingeniería, que permiten dar frente al cambio climático asegurando la supervivencia de los procesos agrícolas en el mundo, a continuación, se presenta una revisión literaria sobre los 10 artículos más citados en *Scopus*, filtrando la búsqueda de cambio climático y agricultura, con las investigaciones en ingeniería.

Una perspectiva desde el impacto ambiental que sugiere la producción de alimentos en el mundo, hace repensar que la estrategia de innovación y desarrollo hacia la agricultura, debe incluir dentro de sus parámetros la relación entre producción e impacto. La generación de Gases Efecto Invernadero GEI dentro de la cadena de producción de alimentos, establece que el desperdicio de éstos hace ineficiente la cadena de Consumo-Producción, por ello se deben evaluar dos escenarios importantes dentro de los procesos en la agricultura, inicialmente establecer un cambio en la dieta que permita incluir un balance de alimentos saludables y equilibrados para así, obtener un modelo eficiente que satisfaga la demanda y pueda permitir una oferta de productos, de forma inteligente y racional en el uso de las tierras y recursos naturales [15]. Por otro lado, la relación entre la producción de alimentos, la energía requerida y el uso de los recursos naturales, es el segundo escenario que se debe replantar estrategias que permitan mitigar la presión ejercida sobre los sistemas planetarios, la sociedad y los ecosistemas.

En [16] se establece que los cumplimientos en las aspiraciones humanas para un futuro, se concentran en la calidad de vida, la educación significativa, la previsión y adaptabilidad, y el uso sostenible de los recursos naturales; éste último en especial, requiere de todos los aportes e ingenio disponibles de la ciencia, pues la seguridad alimentaria y el acceso ésta, en el futuro se ven amenazadas si no se regula de forma equitativa el uso los recursos. Un ejemplo de la huella de carbono en la producción de arroz, trigo y maíz se puede observar en el estudio realizado en China en granjas productoras de estos alimentos, donde se obtuvo que el uso de fertilizantes contribuye entre un 44% hasta un 79% en la emisión de CO₂, las operaciones mecánicas entre un 8 a 15%, el riego contribuye con el 19% y las emisiones de metano en un 25%, todo esto para la producción de arroz, uno de los productos más consumidos en el mundo. El estudio concluye la huella de carbono de los cultivos depende en gran parte del tamaño de la granja y especialmente de los cambios climáticos, lo que infiere la necesidad de controlar las condiciones climáticas de éstas [17].

Una alternativa naciente y promisoría es la Agricultura Climáticamente Inteligente (CSA), que propone desde un proceso político social y mundial, a través de la alianza global para la CSA, el uso sostenible de los sistemas agrícolas para lograr la seguridad alimentaria y de nutrición para la demanda futura, integrando la adaptación y mitigación de los GEI. Principalmente la estrategia sugiere el uso de tecnologías y estrategias debidamente estudiadas y probadas, para lograr equilibrar la producción de alimentos en el mundo y el impacto ambiental que tiene éste [18].

Con la venida de la cuarta revolución industrial, diferentes países han apostado gran parte de su desarrollo tecnológico hacia el campo agropecuario, asegurando así el alimento natural del mundo venidero, pero desde hace años las técnicas de agricultura de precisión han unidos esfuerzos para garantizar este objetivo. El desarrollo y uso de dispositivos tecnológicos que permiten mejorar los procesos en la agricultura, como las herramientas de la Tecnología de la Información y las Comunicaciones (TIC) [19], que permiten digitalizar los datos claves en el campo, permitiendo la toma de decisiones oportunas y pertinentes para optimizar los resultados de las cosechas.

Pero un problema común en el campo de países subdesarrollados es el poco uso de dichas innovaciones [20], han propuesto el desarrollo de dispositivos bajo la estrategia de Diseño Basado al Usuario (UCD) enfocados hacia el personaje foco del sector, permitiendo sistemas cyber-físicos que en cooperación, permitan la creación de Sistemas de Apoyo a la Decisión Agrícola (AgriDSS). Para lograr desarrollar estos sistemas, es fundamental la adquisición de los datos con estrategias eficientes, como la teledetección, que permite la extracción de datos sobre las variables físico-químicas de la tierra, obteniendo una variedad de información que proporciona valores y modelos para predecir desastres naturales o comportamientos irregulares en el clima, así como en las tierras de cultivo, fortaleciendo las estrategias propuestas de la agricultura de precisión [21].

De las tecnologías emergentes para recolección de datos, los Vehículos no Tripulados (AUV) y los sistemas robóticos móviles como los Vehículos Guiados Automáticamente (AGV), han dado solución a diferentes necesidades del campo, como el desplazamiento innecesario y la rápida obtención de datos [22]. Pero dichas tecnologías presentan dos problemas fundamentales al momento de su implementación, que su función está restringida a condiciones ideales o a un tipo de tierra, y que su control debe estar basado en el modelo de cada entorno, lo que hace, aún más, específico el diseño para cada tipo de terreno [23]. Por ello la tendencia en investigación apostado a sistemas estáticos, eficiente, adaptables y modulares.

Por lo anterior, los dispositivos Registradores de Datos (Dataloggers) son una solución de los equipos estáticos, que muestran los datos almacenados en los equipos, pero su análisis es pertinente al observador, así como la decisión frente a la información recolectada, por ello, se ha apostado a la creación de Sistemas de Adquisición de Datos (DAS) que no solo almacenan, sino que pueden realizar tratamientos de datos de forma restringida a una cantidad de

memoria y necesidades. Para suplir la necesidad de recolectar datos de diferentes plazas, nacen las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network) que pueden ser de dos tipos: Dispositivos con transmisores o dispositivos de procesamiento con redes de sensores alámbricos, que procesan parte de los datos y luego envían éstos [24]. El procesar la información antes de enviar millones de datos, hace más atractivo el uso de DAS con procesadores y redes alámbricas de sensores. Con el acceso a internet, la información puede ser transmitida hacia servidores en la nube para darle un tratamiento, a esto se le conoce como el Internet de las Cosas (IoT) [25, 26]. El envío eficiente de información hacia la nube es un tema que permite alargar la vida útil de los sensores del DAS, así como el uso óptimo del canal y ancho de banda de la WSN.

Ahora bien, la recolección de datos, su tratamiento, análisis y resultados son sumamente importantes para el desarrollo de la agricultura, pero es necesario agregar a estos sistemas, tecnologías digitales que permitan la toma de decisiones frente a datos históricos y en tiempo real sobre el clima. Existen protocolos de comunicación que hacen eficientes la transmisión de los datos que, acompañados de controles automatizados, pueden suministrar de forma inteligente el agua necesaria para los cultivos [27].

Baranwal, Nitika y Pateriya [28], desarrollaron un sistema basado en WSN e IoT bajo la plataforma Python, donde mediante scripts lograron una mejora del proceso de producción agrícola del 84.8%, enfocados en el monitoreo de las condiciones físico-químicas de la tierra y el ambiente, los roedores e insectos y las enfermedades. Giusti y Marsili-Libelli [29], proponen el uso de Sistemas de Apoyo para la decisión Difusa (FDSS) que se alimenta de datos existentes en la red, valores climatológicos en tiempo real e históricos, autoaprendizaje por medio de la experiencia humana, para lograr determinar una lógica difusa que sea la más aproximada al valor óptimo en el riego y uso consiente del recurso hídrico. Garnica et al. proponen un sistema de riego localizado o micro-riego basado para cultivos de Hortalizas en invernadero en Almería España, donde sus características se basan en una distribución por tuberías de PVC con micro-goteo o microirrigación directamente sobre las raíces de los cultivos, a menos de 2 bar de presión, adicionando en las líneas de suministro de agua, nutrientes que evitan pérdidas y aumentan la eficiencia. Aún que el sistema propuesto en [30] es sumamente eficiente en cuanto al ahorro de agua, incluso entre 21 tecnologías evaluadas, el costo de implementación requiere de una fuerte suma de dinero para lograr el objetivo total del sistema. Para la medición de la relación entre el consumo de agua de las plantas y la evaporación de ésta, proponen utilizar tensiómetros ubicados estratégicamente por el invernadero, estos sensores son de bajo costo y especialmente se recomienda el uso de transductores tensiómetros eléctricos que permitan ser integrados en la red de trabajo privada del cultivo.

El uso de sensores inalámbricos para la recolección de información sobre el cultivo, junto con una relación entre de datos meteorológicos, suponen las variables necesarias para evaluar el riego eficiente en cultivos, junto con un modelo del sistema basado en las condiciones de la tierra, el cultivo y la atmósfera climática, permiten realizar un sistema de control PID (Proporcional, integral y derivativo), además de modelos de control predictivos (MPC). Pero el problema se centra en la implementación de grandes superficies de cultivos, donde el sistema empieza a perder controlabilidad. Para suplir las necesidades de cultivos de grandes superficies, se propone un modelo de balance hidrológico donde se establece la relación entre el [riego-lluvia-aumento capilar] menos [evaporación - transpiración de la planta - escorrentía o escurrimiento del agua y percolación profunda] como se observa en la Figura 10 (a). La diferencia entre el sistema de control PID o MPC mencionado, es la inclusión de las dinámicas del sistema del balance hidrológico y las variables meteorológicas locales del cultivo, basados en un modelo de control predictivo que a su vez tiene un bloque de optimización y está dentro de un lazo cerrado [31].

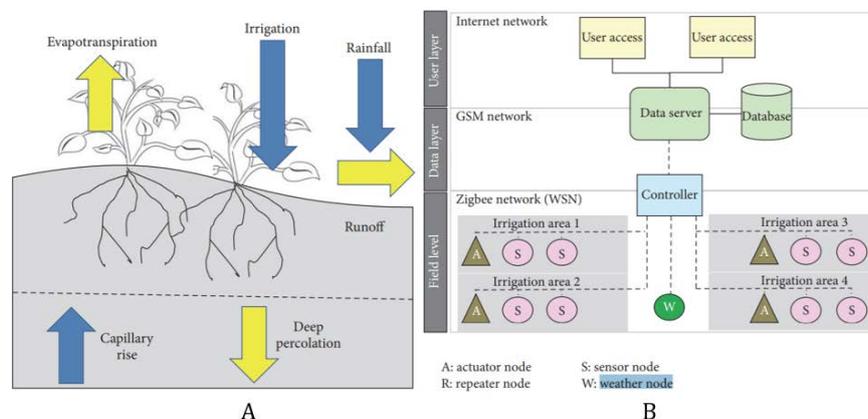


Figura 10. A) Balance hidrológico en cultivos, B) Arquitectura del sistema de riego automatizado [31]

Del trabajo anterior, se logró establecer que entre una metodología de control basado en el tiempo de riego (técnica 1), técnica basada en el conocimiento empírico, y el modelo de control predictivo en lazo cerrado (técnica 2), la reducción de consumo de agua en 15 días fue de 24000 litros para la técnica 1, a 7.000 litros en la técnica 2, lo que significa un ahorro del recurso hídrico del 29.2% [31].

4. CONCLUSIONES

El crecimiento demográfico acelerado exige una demanda superior de productos alimenticios que permitan compensar los requerimientos básicos de la población [32], los sistemas de producción en la actualidad se ven afectados por problemas climáticos, sociales y económicos, lo que ha reducido enormemente la distribución adecuada en cantidad y calidad de bienes en los mercados [33]; como alternativa para solucionar estos problemas, se considera la inclusión de tecnologías controladas que permiten manejar adecuadamente los sistemas de producción, de esta manera mejorar el uso de los recursos e incrementar la productividad de los cultivos [34]. Desde tiempos remotos se han originado importantes avances en el uso de métodos de tratamiento y control de la información en la agricultura, con estos progresos se ha creado el concepto nuevo de Agricultura de precisión, donde el hombre con inteligencia más concreta y la experiencia, crea nuevas formas, sencillas y directas para su beneficio en la agricultura.

Así como se hace necesario el trabajo interdisciplinario para la optimización de los recursos del sector agrícola, también, se puede analizar la complementariedad de los sectores en términos del aprendizaje tecnológico y la acumulación de capacidades intra e intersectoriales. El cambio tecnológico en la agricultura, por ejemplo, involucra mejoras del proceso de transformación técnica y biológica para obtener cierto producto, por lo que es necesario fomentar el aprendizaje intersectorial. Esta relación entre los sectores se puede constatar en la integración de industrias, como en el caso de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) y la agricultura, o la biotecnología aplicada al desarrollo agropecuario. En estas áreas se puede observar la integración de tecnologías y un proceso de convergencia y transformación productiva que desemboca en una mayor productividad [35].

Aún existe una brecha tecnológica entre las zonas rurales y urbanas en el país. Poder llevar e implementar diferentes soluciones tecnológicas a los productores agrícolas, apoya la transformación del campo como estrategia transversal para fortalecer la competitividad del sector agrícola según el Plan Nacional de Desarrollo [36]. Con la adopción de tecnologías en la agricultura de precisión tales como: sistemas de posicionamiento, tecnologías de tasa variable (VRT), sensores remotos, sistemas de análisis aplicados a las cosechas, aeronaves pilotadas remotamente (RPA), sistemas de soporte de decisiones (DSS) y sistemas robóticos, permitirá mejorar el rendimiento de los cultivos. Así mismo teniendo en cuenta que la implementación de estas tecnologías y dispositivos depende del tipo de cultivo, su ubicación geográfica y factores ambientales, con la integración adecuada de las TIC, dará como resultado un impacto directo en la productividad, economía y desarrollo social del campo en Colombia.

REFERENCIAS

- [1] ONU. (2015). Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015. Resolución 70/1. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. ONU New York.
- [2] FAO y UNICEF. (2017). The state of food security and nutrition in the world. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [3] Todeschini, R. y Baccini, A. (2016). Handbook of bibliometric indicators: quantitative tools for studying and evaluating research. John Wiley.
- [4] Camino, E., Ruggeroni, J. y Sánchez, F. (2015). Quinto informe de evaluación del IPCC: Informe de síntesis. Revista Tiempo y Clima, 5(47), 89-98.
- [5] Nullis, C. (2018). El IPCC publica el informe especial sobre el calentamiento global de 1,5°C: Cada décima de grado importa. IPCC.
- [6] Porter, S. et al. (2016). A half-century of production-phase greenhouse gas emissions from food loss and waste in the global food supply chain. Science of the Total Environment, 571, 721-729.
- [7] Millar, R. et al. (2017). Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 °C. Nature Geoscience, 10(10), 741-747.
- [8] López, A. y Hernández, D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. El Trimestre Económico, 83(332), 459-496.
- [9] Jat, M. et al. (2016). Climate change and agriculture: Adaptation strategies and mitigation opportunities for food security in South Asia and Latin America. Advances in Agronomy. International Maize and Wheat Improvement Centre.
- [10] DANE. (2016). III. Censo nacional agropecuario. Tomo 2, Resultados. DANE.
- [11] Villanueva, D. (2018). Estudios sobre la Bioeconomía como fuente de nuevas industrias basadas en el capital natural de Colombia. Estudios sobre la bioeconomía, 56, 1-49.
- [12] Valipour, M., Gholami, M. y Eslamian, S. (2015). Surface irrigation simulation models: A review. International Journal of Hydrology Science and Technology, 5(1), 51-70.
- [13] Soto, A. (2019). Comprensión del sector agropecuario frente al Cambio climático, fenómeno de el niño y fenómeno de la niña en el sector agropecuario en cuatro municipios de Cundinamarca. ICA.
- [14] Cortés, Y. y Alarcón, J. (2016). Impactos del cambio climático sobre las áreas óptimas de nueve cultivos en Cundinamarca-Colombia. Temas Agrarios, 45, 51-64.
- [15] Hallström, E., Carlsson, A. y Börjesson, P. (2015). Environmental impact of dietary change: A systematic review. Journal of Cleaner Production, 91, 1-11.
- [16] Scott, C., Kurian, M. y Wescot, J. (2015). The water-energy-food nexus: enhancing adaptive capacity to complex global challenges. In Governing the Nexus: Water, Soil and Waste Resources Considering Global Change. Tucson, USA.
- [17] Yan, M. et al. (2015). Carbon footprint of grain crop production in China - Based on farm survey data. Journal of Cleaner Production, 104, 130-138.

- [18] Long, T., Blok, V. y Coninx, I. (2016). Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: Evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy. *Journal of Cleaner Prod.*, 112, 9–21.
- [19] Walter, A. et al. (2017). Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(24), 6148–6150.
- [20] Lindblom, J. et al. (2017). Promoting sustainable intensification in precision agriculture: Review of decision support systems development and strategies. *Precision Agriculture*, 18(3), 309–331.
- [21] Dalla, M. et al. (2015). Challenges and opportunities of multimodality and data fusion in remote sensing. *IEEE Science*, 103(9), 1585–1601.
- [22] Cambra, C., Díaz, J. y Lloret, J. (2015). Deployment and performance study of an ad hoc network protocol for intelligent video sensing in precision agriculture. *Lecture Notes in Computer Science*, 8629, 165–175.
- [23] Hu, J. et al. (2015). Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(10), 1–10.
- [24] Jawad, H. et al. (2017). Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors. Switzerland Science*, 17(8), 156-166.
- [25] Pang, Z. et al. (2015). Value-centric design of the internet-of-things solution for food supply chain: Value creation, sensor portfolio and information fusion. *Information Systems Frontiers*, 17(2), 289–319.
- [26] Ray, P. (2017). Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9(4), 395–420.
- [27] Nikolidakis, S. et al. (2015). Energy efficient automated control of irrigation in agriculture by using wireless sensor networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 113, 154–163.
- [28] Baranwal, T., Nitika, P. y Pateriya, P. (2016). Development of IoT based smart security and monitoring devices for agriculture. En 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering. New York, USA.
- [29] Giusti, E. y Marsili, S. (2015). A Fuzzy Decision Support System for irrigation and water conservation in agriculture. *Environmental Modelling and Software*, 63, 73–86.
- [30] Garcia, P. et al. (2017). Integral management of irrigation water in intensive horticultural systems of Almería. *Sustainability Switzerland Science*, 9(12), 78-89.
- [31] Lozoya, C. et al. (2016). Sensor-based model driven control strategy for precision irrigation. *Journal of Sensors*, 59, 67-78.
- [32] Navarro, V. (2014). ¿Viva el decrecimiento? *Pensamiento Crítico*, 89, 45-59.
- [33] García, E. (2015). Los derechos humanos más allá de los límites al crecimiento. *Ambienta*, 113, 28–41.
- [34] Prieto, L. (2001). Caminos del cambio tecnológico en las agriculturas españolas contemporáneas. *Crítica Barcelona*.
- [35] Padilla, R. (2017). Política industrial rural y fortalecimiento de cadenas de valor. CEPAL.
- [36] Orozco, O. y Ramírez, G. (2015). Sistemas de información enfocados en las tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar, una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 15(28), 83-102.

Proceso para la elaboración de un aglomerado a base de madera de café

Néstor Ricardo Mejía Nariño
Pablo Valencia Osorio
Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA
Colombia

Se presenta la elaboración de un aglomerado de madera de café evidenciando la caracterización del tamaño de partícula y la formulación de la dosificación del material. Se usó madera de café porque es un residuo característico de la zona cafetera que generalmente es utilizado como leña, lo que produce un impacto ambiental negativo; se calcula que anualmente se genera en todo el país un promedio de 1,400 millones de palos de café. Para el desarrollo del aglomerado primero se caracterizó el tamaño de las partículas de la madera de café mediante la elaboración de 2 prototipos utilizando carpincol como adhesivo y dando como resultado un tamaño adecuado de partícula entre 1 a 1,5 cm por 3 mm de ancho. Posteriormente se realizaron 5 prototipos utilizando otra mezcla de adhesivo de úrea formaldehído, melamina formaldehído y catalizador puesto que esta composición es usada en la elaboración de tableros aglomerados ya que permite que el producto sea utilizado en exteriores, se variaron los porcentajes de dosificación de la madera de café y la mezcla de adhesivos, junto con el método de secado. Como resultado se obtuvo que el mejor prototipo estudiado fue el aglomerado con porcentajes de dosificación de 60% madera de café y 40% mezcla de adhesivo, con un secado de 1 hora en el horno a 150°C, evidenciando una buena cohesión entre las partículas. Se recomienda mejorar el método de prensado y realizar pruebas de resistencia mecánica para valorar las propiedades estructurales del material elaborado.

1. INTRODUCCIÓN

Según la federación nacional de cafeteros Colombia es el tercer productor de café a nivel mundial [1], con 1 millón 100 mil hectáreas sembradas, que equivale aproximadamente unos 7,000 millones de plantas [4]. Se sabe que anualmente se poda el 20% de estas plantas y que cada 5 a 7.5 años los caficultores realizan una renovación del cultivo; este proceso conlleva a que se tenga como subproducto madera de café, aproximadamente 10 millones de toneladas anuales de este material [10]. La madera de café generalmente ha sido considerada como un desperdicio, puesto que la mayoría de los palos se usan como leña, se queman o son arrojados como basura, ignorando su potencial. Según estudios tiene una excelente durabilidad por su resistencia a las plagas y su alta densidad de 0,91 mayor que el de la teca que es de 0,57, además posee alta tensión y abrasión de pegantes y tintes, característica que la ubica entre las mejores maderas para uso en carpintería [10].

Se ha observado algunas experiencias en cuanto al uso de madera de café entre estas se encuentra la empresa monarca que se ubica en el departamento de Antioquia, utiliza la madera de café recolectada de las regiones cafeteras para la elaboración de artículos como muebles, pisos y puertas, y exportan a países como estados unidos e Italia, ellos realizan una selección de los palos que tengan entre 6 y 7 años, y con una medida aproximada de 52 centímetros de largo por 4.5 de diámetro [7]. Otro aporte fue en el 2013, en Filadelfia, Caldas donde el ingeniero Néstor Mejía en compañía de la comunidad, la Pastoral Social, el subdirector del centro para la formación cafetera del Sena, Julián Muñoz Arias, y un arquitecto, construyeron una vivienda modular en madera de café para una familia de bajos recursos [8]. Actualmente en el país se deforestan 180 mil hectáreas de bosque nativo, un aumento considerable del 44% con respecto al 2015, lo que amenaza los compromisos internacionales del país contra el cambio climático [3]. Con el aprovechamiento de la madera de café se calcula reemplazar las maderas de origen tropical, evitando incluso, que se talen 150 mil hectáreas de bosques al año en Colombia [7].

A partir de la oportunidad planteada sobre el potencial de la madera de café y la problemática encontrada con este subproducto, se desarrolló un proyecto aplicado en SENA regional caldas, centro para la formación cafetera, sobre el uso de la madera de café para estructuras constructivas, como un aporte ambiental, social e de innovación colombiana. En las experiencias mencionadas donde se ha utilizado madera de café es necesario realizar una selección de los palos antes de empezar los procesos de transformación, generalmente se escogen los más gruesos los cuales resultan del soqueo que se hace cada 5 a 7.5 años, desperdiciando gran parte de la madera de café. Por lo tanto, se estudió los aglomerados de madera que están compuestos por partículas como son las hojuelas, astillas y viruta, las cuales se combinan con resinas sintéticas u otro tipo de adhesivo [7], siendo una buena alternativa para utilizar todo el palo de café, disminuyendo el desperdicio. Teniendo en cuenta lo anterior en el presente capítulo se pretende mostrar la primera fase de investigación para la elaboración de un aglomerado en base de madera de café, evaluando algunas propiedades y mostrando la mejor alternativa encontrada.

2. MÉTODO

Se empezó con la caracterización de la partícula de madera de café realizando dos prototipos variando el tamaño de partícula para poder definir el mejor tamaño que permitiera un aglomerado consistente del material. Posteriormente con el tamaño de partícula determinado se realizaron cinco prototipos con diferentes proporciones de madera de café y mezcla de resinas y catalizador para determinar la mejor formulación. Caracterización del tamaño de la partícula. Para definir el tamaño de partícula se trabajó con tres diferentes mallas: de 5mm. 8mm. y 10 mm; además se resalta,

en cuanto a los aglomerantes, que de forma preliminar se trabajó con el adhesivo Carpincol que es un pegante muy conocido en la industria maderera, puesto que por sus características químicas es excelente para pegar sillas, puertas, gabinetes, entre otros [2]. Se realizaron cortes de 5 cm de largo a los palos de madera de café, luego con un martillo de goma se hizo 4 cortes a estos trozos (Figura 1) y posteriormente se pasó este material a un molino para obtener la madera de café triturada.



Figura 1. Madera cortada en trozos

Luego la madera se llevó a un horno durante una hora para lograr una humedad entre el 3% y el 4% (Figura 2), puesto que el exceso de humedad en las partículas puede causar la formación de *ampollas* en el material, y si la humedad es insuficiente puede llevar a un pegado deficiente con el adhesivo lo que causa una baja resistencia mecánica [9].



Figura 2. Madera triturada en el horno

Para el primer prototipo se realizó un tamizado a la madera triturada para obtener un tamaño de partícula de 3cm por 5mm de ancho, posteriormente se mezcló con el adhesivo y en una formaleta se le dio las dimensiones de 10*20*5cm y se secó en el horno a 150°C durante 1 hora. Para el segundo prototipo se realizó un tamizado a la madera tritura obteniendo un tamaño de partícula entre 1cm y 1,5cm por 3mm de ancho y en una formaleta de madera se le dio las medidas de 30*20*1,5 cm, luego se le aplicó presión utilizando prensas en C, e igualmente se dejó por 1 hora a 150°C en el horno. Este producto fue un diseño preliminar ideal para interiores, pero presentó deficiencias puesto que se humedece cuando entra en contacto con el agua debido a la utilización del Carpincol como adhesivo. Además, tiende a cambiar el color de los acabados al mezclarse con la madera de café, por lo cual se estudió otras sustancias para reemplazar el Carpincol. Formulación aglomerada de madera de café.

Se estudió otro tipo de sustancias para aglomerar la madera de café, para esto se realizó una revisión bibliográfica sobre el proceso industrial de aglomerados de madera junto con una visita a la empresa Tablemac en la ciudad de Manizales, y se determinó que para que el aglomerado sea funcional es adecuado mezclarlo con 3 sustancias, las cuales son, urea formaldehído (Resina 216 Fel), que tiene la ventaja de mezclarse en un amplio intervalo de temperaturas y condiciones, posee resistencia a los microorganismos y a la abrasión, resistencia térmica y por su transparencia y ausencia de color una vez curada la hacen ideal para el acabado esperado [5], se utilizó además la melamina formaldehído (Resina 103) que le proporciona a la mezcla resistencia a la humedad ya que se pretende que el aglomerado sea utilizado en exteriores y un catalizador que favorecer la reacción entre las dos resinas y protege a la mezcla contra plagas. Con la asesoría del instructor Gustavo Adolfo Peña se determinó las cantidades adecuadas para la mezcla las cuales quedaron con los siguientes porcentajes de Urea el 55%, de melamina el 40% y de catalizador 5%. Además, se tuvo en cuenta un excedente del 5% para la mezcla de las resinas y el catalizador, puesto que este proceso se realiza de forma manual por lo cual se pierde esta cantidad de material (Figura 3).

Después de definir las proporciones de la mezcla de adhesivo se realizaron cinco prototipos mostrados en la Tabla 1 variando el porcentaje de dosificación y el método de secado, entre temperatura ambiente y en el horno por 1 hora a 150°C. Se utilizó una formaleta para realizar el prensado de los tableros y darles las dimensiones de 30x20x1.5cm (Figura 4).



Figura 3. Mezclado de la madera de café triturada con las resinas y el catalizador

Tabla 1. Descripción de los prototipos

Prototipo	Madera	Mezcla Resinas-catalizador	Método secado
1	50%	50%	Horno 150°C
2	60%	40%	Horno 150°C
3	60%	40%	Temperatura ambiente
4	70%	30%	Horno 150°C
5	70%	30%	Temperatura ambiente



Figura 4. Formaleta utilizada para darle las dimensiones a los prototipos

Basados en los cinco prototipos de la Tabla 1 se evaluaron cinco características claves, la humedad percibida, la cohesión entre las partículas del aglomerado y la viabilidad en cuanto al costo, teniendo en cuenta que la madera de café es un residuo por lo cual su costo no se considera determinante, pero las resinas y el catalizador si representan un costo importante a evaluar.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De la caracterización de la partícula se observó que el primer prototipo se observó con mucha humedad superficial y la madera no aglomero de forma uniforme por el tamaño de la partícula de 3cm por 5mm de ancho (Figura 5).



Figura 5. Prototipo con partículas de 3cm

El segundo prototipo presentó características adecuadas para su grosor y forma, y no presento deformidades al aplicar fuerza (Figura 6). Por lo tanto, se escogió para realizar la formulación del aglomerado un tamaño de partícula entre 1cm y 1,5cm por 3mm de ancho.



Figura 6. Prototipo con partículas entre 1cm y 1.5cm por 3mm de ancho

Para la formulación del aglomerado a base de madera de café se obtuvieron los siguientes resultados para los cinco prototipos estudiados. El prototipo 1 no mostro humedad percibida y presento una excelente cohesión entre las partículas del aglomerado, teniendo en cuenta que representa el costo más elevado entre los prototipos evaluados. El prototipo 3 presentó humedad percibida en su superficie, mientras que el prototipo 2 mostró una adecuada cohesión entre las partículas y sin rastros de humedad percibida.

El prototipo 4 y 5 presento desprendimiento de material a causa de la poca cohesión entre las partículas sobre todo en el prototipo 5. A partir de los resultados obtenidos se determinó que la mejor alternativa encontrada fue el prototipo 2 este es el aglomerado de 60% madera triturada de café y 40% resinas y catalizador, con un método de secado a una temperatura de 150°C por 1 hora en el horno, puesto que mostro una buena cohesión entre las partículas, se mostró consistente y regida, y no presento desprendimiento de material, además representa menor costo en las materias primas en comparación del prototipo 1. En la Tabla 2, se presentan las cantidades en gramos de los materiales utilizados para el prototipo 2.

Tabla 2. Cantidad materiales utilizados para prototipo 2

Materiales	Cantidades en gramos
Madera de café	250
Úrea formaldehído (Resina 216 FEL)	70
Melamina formaldehído (Resina 103)	96,25
Catalizador	8,75
Suma total Resinas y catalizador con excedente	425

4. CONCLUSIONES

- El tamaño de la partícula es una variable fundamental en el proceso de aglomerado puesto que determina en gran medida la consistencia y resistencia de los tableros.
- Se recomienda realizar pruebas de resistencia a la comprensión y cizallamiento para poder tener un referente más sólido en cuanto a las propiedades estructurales del material elaborado.
- El secado del aglomerado es un proceso fundamental puesto que permite una mayor consistencia del material, esto se observó con las diferencias evidenciadas con prototipos de secado en el horno y a temperatura ambiente, mostrando mayor consistencia los prototipos secados en el horno por 1 hora a 150°C.
- El proceso para la obtención del aglomerado de madera de café fue muy artesanal por lo cual se puede lograr mejoras mediante la implementación de un proceso más industrializado.
- La humedad es un factor importante para trabajar la madera triturada por lo cual es una variable que se debe controlar durante todo el proceso.

REFERENCIAS

- [1] AFP y redacción economía. (2017). Bajó producción de café durante primer semestre de 2017. El espectador. Recuperado: <https://www.elspectador.com/economia/bajo-produccion-de-cafe-durante-primer-semestre-de-2017-articulo-701657>.
- [2] Castor. (s.f.). Catálogo de pegamentos. Recuperado: http://www.castor.pe/resource/download/catalogo_pdf/pdf_13269922244f184b60a4999.pdf.
- [3] Revista Semana. (2017). ¿Cómo va la lucha contra la deforestación en Colombia? Recuperado: <http://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/deforestacion-en-colombia-como-va-la-lucha-para-contenerla/38870>.
- [4] Correa, J. (2007). De palos de café, que usualmente se queman, se produce madera fina y sólida para fabricar muebles. El Tiempo. Recuperado: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-3579649>.
- [5] Estévez, P. (2012). Desarrollo, caracterización y optimización de resinas base urea-formol (uf), como adhesivos para tableros aglomerados con baja emisión de formaldehído. Disertación doctoral. Universidad de Burgos.
- [6] Portafolio. (2010). Exportaciones de madera de café en Colombia comenzarán en julio del 2010. Recuperado: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/exportaciones-madera-cafe-colombia-comenzaran-julio-2010-289310>.
- [7] Grupo monarca. (2009). Muebles con aroma de café. Fórum café, curiosidades. Recuperado: http://www.forumdelcafe.com/sites/default/files/biblioteca/f-39_muebles_de_cafe.pdf.
- [8] Jaramillo, J. (2014). La madera del café para construcciones campesinas. La Patria. Recuperado: <http://www.lapatria.com/columnas/la-madera-del-cafe-para-construcciones-campesinas?page=3>.
- [9] Keil, G. y Spavento, M. (2009). Industria de tableros particulados. Universidad de la plata. Recuperado: http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/19385/mod_resource/content/1/INDUSTRIAS%20DE%20TABLEROS%20DE%20PART%C3%8DCULAS%202009.pdf.
- [10] El Diario. (2010). Se impone la madera de café. Recuperado: <http://www.eldiario.com.co/seccion/ECONOMICA/se-impone-la-madera-del-caf-100122.html>.

Diseño y desarrollo de un prototipo para la medición de material particulado PM_{2.5} utilizando herramientas IoT

Ángel Alejandro Rodríguez Aya¹

John Alejandro Figueredo Luna¹

Juan Alejandro Chica García¹

Carlos Ariel Beltrán Enciso²

María del Pilar Wilches²

¹Universidad Nacional Abierta y a Distancia

²Corporación Autónoma de Nariño
Colombia

La calidad del aire es uno de los parámetros ambientales de interés a medir por parte de los gobernantes de ciudades con alta densidad de población y alto crecimiento económico, en los cuales, en sus diferentes procesos productivos tales como transporte, transformación de materia prima y producción, generan un alto grado de contaminación; uno de los parámetros a medir derivados de estos procesos es el material particulado, más conocido como PM, es el termino para un mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire y se clasifican en PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁, en esta investigación se enfocara en el análisis de PM_{2.5}, las cuales son partículas inhalables finas que tiene diámetros de por lo general 2.5 micrómetros y pueden provocar diferentes problemas como asma agravada, función pulmonar reducida, enfermedades cardiacas o pulmonares y en casos más avanzados la muerte de personas debido a tiempos prolongados de exposición de altas concentraciones de PM_{2.5}. Este estudio, consiste en validar la concentración de material particulado PM_{2.5} por dos prototipos con los mismos componentes electrónicos y aplicando herramientas IoT en dos ubicaciones geográficas distintas de la ciudad de Villavicencio; la primera en una zona residencias de poco flujo vehicular y distante de industrias, y la segunda una zona de alto flujo vehicular de transporte de carga, servicio público y cerca de sectores industrializados, con el fin de medir la variación de concentración de material particulado a diferentes horas del día. En este estudio se encontró un incremento del 30% de concentración de material particulado PM_{2.5} de la zona no residencial y alto flujo de transporte comparado con la zona residencial, aunque los niveles están por debajo de los límites mínimos permisivos, lo que indica que existe un impacto moderado bajo de la contaminación del aire en un punto de alto tráfico vehicular de la ciudad de Villavicencio.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas y debido al avance industrial, económico, comercial y la evolución tecnológica generada por el ser humano, ha provocado grandes afectaciones al medio ambiente; diferentes tipos de agentes contaminantes se emiten a diario al planeta como efectos derivados de diversos procesos industriales y de transporte. Un caso especial de estudio es la contaminación del aire, el cual hace 5 décadas despertó la preocupación por parte de la OMS (Organización Mundial de la Salud), en donde en el año de 1976 esta institución publicó el artículo denominado *Air monitoring programme design for urban and industrial areas* [1], el cual fue una de las primeras publicaciones en la que se informaron los procedimientos y parámetros para la medición de la calidad del aire en zonas urbanas e industriales, en aras de parametrizar y normalizar los dispositivos de medición para cumplir esta labor, documentación que se convirtió en un referente internacional para la promulgación de leyes nacionales e internacionales en todo lo relacionado con la calidad del aire.

En años más recientes y revisando la normatividad Colombiana, se puede encontrar la Resolución 601 de 2006 por la cual se establece la Norma de calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia [2], cuatro años después, se emite la Resolución 650 de 2010 en la cual se adopta el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en Colombia, en esta resolución se establece las directrices, metodologías y procedimientos necesarios para llevar a cabo las actividades de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en el territorio nacional [3], por otra parte en el mismo año el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial emite la Resolución 2154 de 2010, con el fin de incluir el texto protocolo adoptado que se omitió en la Resolución 650 de 2010 [4], finalmente, se emite la Resolución 2254 de 2017 por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones con el objeto de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana; vale la pena destacar que en esta última resolución se publican los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire de PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, O₃, CO, en donde se establece en su parágrafo 1, a partir del 01 de julio de 2018, los niveles máximos permisibles de PM₁₀ y PM_{2.5} para un tiempo de exposición 24 horas serán de 75µg/m³ y 37µg/m³ respectivamente [5]. Estas resoluciones emitidas por el Gobierno Nacional a través demuestran el interés y la preocupación sobre los impactos producción la contaminación del aire.

Actualmente, en Colombia, la evaluación de los efectos contaminantes atmosféricos sobre la población se realiza a través del Índice de Calidad del Aire (ICA), el cual corresponde a un valor adimensional en donde se asigna una determinada concentración, categoría y color, representando los potenciales efectos asociados a la salud. El índice ICA se calcula para seis de los siete criterios contemplados en la norma Nacional (O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, SO₂ y NO₂) en tiempos de exposición de 1 hora y 24 horas de acuerdo con los protocolos establecidos en la norma [6]. En la Figura 1 se puede apreciar la escala del índice de calidad del aire.

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm (1)	PM ₁₀ 24h µg/m ³	PM _{2.5} 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
0 - 50	Verde	Buena	0,000 - 0,059	-	0 - 54	0,0 - 15,4	0,0 - 4,4	0,000 - 0,034	(2)
51 - 100	Amarillo	Moderada	0,060 - 0,075	-	55 - 154	15,5 - 40,4	4,5 - 9,4	0,035 - 0,144	(2)
101 - 150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0,076 - 0,095	0,125 - 0,164	155 - 254	40,5 - 65,4	9,5 - 12,4	0,145 - 0,224	(2)
151 - 200	Rojo	Dañina a la salud	0,096 - 0,115	0,165 - 0,204	255 - 354	65,5 - 150,4	12,5 - 15,4	0,225 - 0,304	(2)
201 - 300	Púrpura	Muy dañina a la salud	0,116 - 0,374 (0,155 - 0,404) (4)	0,205 - 0,404	355 - 424	150,5 - 250,4	15,5 - 30,4	0,305 - 0,604	0,65 - 1,24
301 - 400	Marrón	Peligrosa	(3)	0,405 - 0,504	425 - 504	250,5 - 350,4	30,5 - 40,4	0,605 - 0,804	1,25 - 1,84
401 - 500	Marrón	Peligrosa	(3)	0,505 - 0,604	505 - 604	350,5 - 500,4	40,5 - 50,4	0,805 - 1,004	1,85 - 2,04

Figura 1. Puntos de corte del índice de calidad del aire ICA en Colombia [IDEAM]

Se puede apreciar en la figura 1, que la medición de la calidad del aire se establece con la participación de las seis variables O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, SO₂ y NO₂, en el que se obtiene una escala y color que inicia con una calificación buena (color verde) y un índice ICA de 0 a 50 y va hasta peligrosa (Color marrón) y un índice de 401 a 500, en donde los organismos de control de cada región del país puede basarse para publicar los resultados y alarmas sobre la calidad del aire emitida por alguna estación de medición del país; en esta investigación se centrará en medir el material particulado PM_{2.5}, ya que es uno de los agentes contaminantes presentes en el aire que afectan a las enfermedades pulmonares y en algunos casos del corazón. Para el PM_{2.5}; en Colombia y de acuerdo con su normatividad vigente, se establece que una concentración mayor de 37µg/m³ puede provocar afectaciones sobre la salud humana, por tal razón se tendrá en cuenta este umbral para analizar los datos de las mediciones.

Según los datos en la página oficial del Gobierno Colombiano de datos abiertos (www.datos.gov.co), se logra obtener los valores de referencia para el año 2018, el cual es el último año reportado en ese portal, en donde se puede establecer que Colombia cuenta con alrededor de 100 estaciones de medición de calidad del aire en todo su territorio nacional capaces de medir PM_{2.5}, en las que se pueden obtener información para analizar las concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} por estación y los días de excedencias de PM_{2.5} por estación de monitoreo; estos dos últimos parámetros de medición son unos de los criterios más importantes a tener en cuenta para el análisis de calidad del aire en cuanto a PM_{2.5}; para esta investigación se tomara como referencia los días de excedencias de PM_{2.5} por estación de monitoreo ya que a la fecha no se cuenta con una medición anual para realizar un análisis de las concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} por estación.

En referente a los datos consultados de PM_{2.5} para el año 2018, último año reportado por el gobierno nacional, se tiene los días en los cuales se excedió el nivel máximo permitido de PM_{2.5} por estación de monitoreo, en donde se tuvo en cuenta las 10 estaciones de medición en todo el país que superaron el mayor número de días el límite máximo permitido de 37µg/m³ cada 24 horas [6], con el fin de tener una referencia sobre cuáles localidades o estaciones son las que presentan mayor interés, las cuales se pueden apreciar en la Figura 2 .

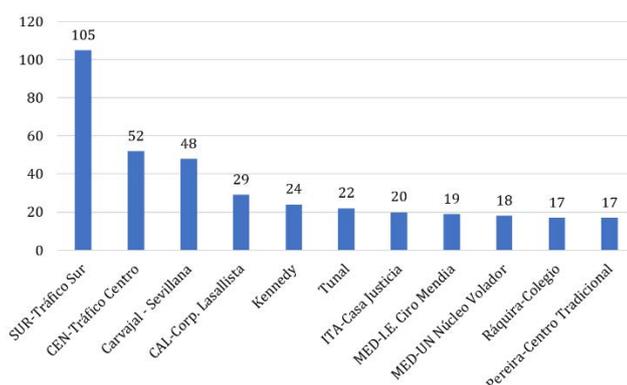


Figura 2. Días de excedencias de PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2018. Límite de 37µg/m³

El departamento de Antioquia posee el mayor número de días en donde sus estaciones de medición superaron el límite máximo permitido de 37µg/m³, para un total de 243 días de todo el conjunto de estaciones en diferentes puntos del departamento, le sigue el departamento de Cundinamarca con un total de 94 días y en el tercer lugar un empate de Boyacá y Risaralda con 17 días, lo que contrasta con los departamentos de Antioquia y Cundinamarca poseen la mayor contaminación por PM_{2.5}, puesto que son los departamentos que tienen mayor desarrollo económico y densidad poblacional.

Teniendo como referente la contextualización anteriormente mencionada, se puede tener un panorama de las mediciones de PM_{2.5}, en localizaciones críticas en diferentes puntos de país, lo que es un buen punto de partida para analizar los datos de la ubicación de la estación de medición prototipo.

Se hace necesario hacer esta contextualización del histórico normativo en Colombia y el estado del arte de las mediciones y estaciones, puesto que en los datos consultados en los informes del IDEAM y la página oficial de datos abiertos del gobierno nacional, no se evidencian datos de mediciones de calidad del aire de ninguna variable y ningún año en el departamento del Meta, lo que indica que a la fecha no se tienen datos oficiales publicados en este departamento, lo cual hace importante desarrollar equipos que sirvan como referencia para la toma de decisiones en la parte de salud pública local; Adicionalmente, se conoció por indagaciones de los investigadores realizadas en Cormacarena (Corporación Autónoma Regional) con presencia en el Departamento del Meta, se indica la existencia de 3 estaciones para cumplir esta medición pero estas no se encuentran en funcionamiento a la hora de la redacción de este capítulo, situación que hace indispensable comenzar a tomar medidas de estas variables y conocer la situación de un área específica en el municipio de Villavicencio.

El desarrollo de esta investigación se realizará por medio de herramientas de hardware de bajo costo, con sistemas embebidos basados en el microcontrolador ESP8266, especialmente diseñado para aplicaciones de IoT (Internet de las Cosas), Software e IDE compatible con sistemas ARDUINO y la herramienta en línea como Thingspeak desarrollada por MathWorks, la misma empresa que desarrolla el Software Matlab para uso en la Ingeniería. Thingspeak provee un espacio dinámico en el cual se puede desarrollar una captura de la información casi en tiempo real de la información y se pueden incluir análisis y grafica de datos potenciados con Matlab, lo cual presenta una robustez en el análisis de datos de la investigación.

2. MÉTODO

El presente estudio se realizó en dos lugares específicos de localización en la ciudad de Villavicencio, la primera localización se encuentra en las instalaciones de la Corporación Autónoma de Nariño – AUNAR sede Villavicencio, como se observa en la Figura 3, la cual se encuentra ubicada en las coordenadas geoespaciales 4.120185, -73.644498, punto importante de medición, ya que a sus dos costados del campus se encuentran las vías principales de la ruta Villavicencio - Acacias y Acacias – Villavicencio, tendiendo un gran flujo vehicular de transporte de carga, transporte público urbano y municipal, convirtiéndolo en un punto focal de medición sensible de calidad del aire y en especial de PM_{2.5}, este será uno de los puntos de referencia para analizar si existe un alta concentración de dicho agente contaminante para la salud.



Figura 3. Ubicación geoespacial estación 1, Corporación Autónoma de Nariño sede Villavicencio

La segunda ubicación de referencia fue tomada de una zona residencial con poca afluencia de flujo vehicular y distante de zonas industriales, normalmente una ciudadela conocida como hacienda Rosablanca, donde sus principales construcciones están compuestas por edificios rodeados de humedales y zonas verdes, con una ubicación geoespacial de 4.113959, -73.641648 (Figura 4), zona de referencia posiblemente con baja concentración de PM_{2.5}, estas dos ubicaciones se analizaron estratégicamente para tener dos puntos de medición en distintas partes de la ciudad, con el fin de verificar si puede existir diferencias de la variable ambiental a medir.



Figura 4. Ubicación geoespacial estación 2, Hacienda Rosablanca

2.1 Metodología

La metodología desarrollada en este proyecto se basa en la metodología experimental; esta metodología consiste en que los investigadores controlan las variables que intervienen en el proyecto con el fin de delimitar y relacionar cada una de ellas en aras de construir los pilares de la solución del problema, la cual se fundamenta en el método científico siendo este adecuado para desarrollar este tipo de proyectos de índoles experimental [7] y de carácter tecnológico.

2.2 Método cascada retroalimentada

El desarrollo del proyecto tendrá una aplicación de Hardware y software, para el cual se necesitará desarrollar algoritmos basados en lenguaje de programación estructurada con la finalidad de leer cada uno de los sensores de la estación y establecer los protocolos de comunicación para la aplicación de IoT, en aras de publicar la información en la nube cada cierto tiempo, para ello se ha establecido utilizar el método de cascada retroalimentada, como se puede observar en la Figura 5, permitiendo reevaluar constantemente el funcionamiento del algoritmo para el sistema embebido y así obtener los resultados esperados, pasando por las etapas de definición de requerimientos, análisis y diseño de software, implementación y prueba de unidades, integración y prueba del sistema y finalmente la operación y mantenimiento, lo que permite reevaluar constantemente la funcionalidad de cada etapa e ir realizando los ajustes necesarios para su óptimo funcionamiento [8]

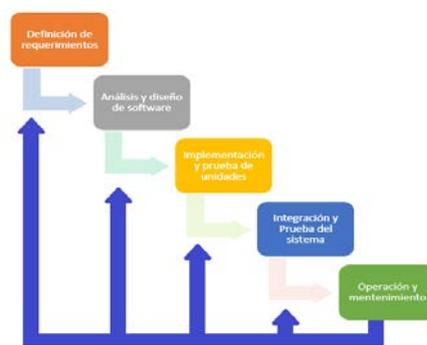


Figura 5. Método Casca Retroalimentada

2.3 Diseño de la estación de medición

El hardware para utilizar en el diseño de la estación de medición de PM_{2.5}, debe basarse en un sistema capaz de leer datos del sensor PMS5003, este equipo posee un protocolo de comunicación serial, adicionalmente, debe ser capaz de tener la posibilidad de conectarse a una red inalámbrica WiFi de 2.4Ghz para enviar los datos a ThingSpeak. Para suplir esta necesidad de operación existen varios dispositivos en el mercado tales como microcontroladores, Sistemas embebidos microcontrolados, sistemas embebidos para IoT, y finalmente sistemas más robustos como sistemas Raspberry Pi u ordenadores; para la elección del sistema de lectura, procesamiento y envío de datos se tomó la opción de encontrar un sistema embebido que tuviese la opción de conectarse a redes de internet WiFi de 2.4Ghz y que fuese confiable y de bajo costo, dentro de las opciones anteriormente mencionadas se optó por el sistema embebido para IoT Wemos D1 mini basado en el microcontrolador ESP8266EX, el cual suple las necesidades de procesamiento y de conexión para la estación de medición.

2.3.1 Tarjeta Wemos D1 mini

La tarjeta Wemos D1 mini es un sistema embebido basado en un microcontrolador ESP8266EX, de bajo consumo y voltaje de operación a 3,3v, posee 11 E/S Digitales y una entrada analógica, por otra parte, cuenta con una velocidad de reloj de 80Mhz/160Mhz y memoria flash de 4M bytes con dimensiones de 34.2mm x 25.6mm con conexión a redes 802.11 b/g/n a 2.4Ghz [9]. La imagen de esta tarjeta se puede apreciar en la figura 6, es ideal para ser implementada en pequeños proyectos gracias a sus dimensiones y bajo consumo de energía.



Figura 6. Tarjeta Embebida para IoT Wemos D1 mini

2.3.2 Sensor PMS5003

El sensor PMS5003, como se aprecia en la Figura 7, es un sensor digital de concentración de partículas con un rango de medición de $0.3\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$; $1.0\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$; $2.5\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$, con un rango efectivo de $\text{PM}_{2.5}$ estándar de 0 a $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una resolución de $1\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un voltaje de operación de 5V y consumo de operación menor a 100mA, cuenta con un MTTF mayor o igual a 3 años, lo que lo hace ideal para el proyecto a desarrollar, su fabricación es de manera compacta con dimensiones de $5\text{cm} \times 3.8\text{cm} \times 2.1\text{cm}$, para finalizar este sensor tiene una eficiencia de conteo del 98% en partículas mayores a $0.5\mu\text{m}$, entregando un alto grado de confianza en las mediciones [11].



Figura 7. Sensor PMS5003

2.3.3 Diagrama de bloques de la estación de medición

Actualmente la estación de medición está compuesta por la tarjeta Wemos D1 mini y el sensor de partículas PMS5003, para esta investigación, se han construido dos estaciones de medición idénticas con el fin de hacer la medición en dos puntos distintos en la ciudad de Villavicencio, por otra parte, a pesar de que en este trabajo se basa en la medición, análisis y estudio de $\text{PM}_{2.5}$, el sensor PMS5003 tiene la posibilidad de medir PM_1 y PM_{10} , adicionalmente el sistema se le han adicionado un sensor de Temperatura y humedad DHT11 y un sensor MQ135 capaz de medir CO, alcohol, CO_2 , Tolueno, NH_4 y Acetona, este sistema se puede apreciar en la Figura 8; los datos obtenidos serán analizados en futuras publicaciones para establecer una relación entre estas variables.

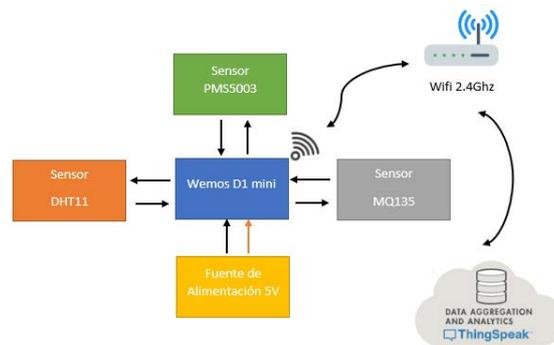


Figura 8. Diagrama de bloques de la estación de Medición de $\text{PM}_{2.5}$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El análisis de resultados se realizó de manera individual por cada una de las zonas de interés a medir el $\text{PM}_{2.5}$, la primera la zona residencial con ubicación geoespacial 4.113959, -73.641648 dentro de zona conocida como Hacienda Rosablanca, y la zona no residencial con alto flujo vehicular en la ubicación geoespacial 4.120185, -73.644498 sede de la AUNAR Villavicencio, para ello se hace necesario analizar la información obtenida de manera individual por cada zona, para después analizarla en conjunto con el fin de cruzar las variables.

3.1 Resultados obtenidos de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en la zona residencial

3.1.1 Medición de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 20 segundos - zona residencial

La ventana de observación de los datos se realizó desde el 05 de junio de 2020 hasta el 29 de junio de 2020, con el cual se obtiene una representación significativa de los datos de $\text{PM}_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ medido para un mes entero, por otra parte, se cuenta con un total de 78950 registros que se realizaron durante este periodo, lo que representa un buen conjunto de datos para el análisis, medición y correlación de datos. El intervalo de tiempo de las mediciones se realizó cada 20 segundos, con el fin de poder observar pequeñas variaciones de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en pequeños intervalos de tiempo, en aras de obtener una respuesta rápida de la variable a analizar, se obtuvieron mediciones

desde valores de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $480 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este último valor muy esporádicamente y con muy pocas repeticiones, las cuales no son representativas en el tiempo, ni para la cantidad total de datos, este comportamiento se puede observar en la Figura 9.

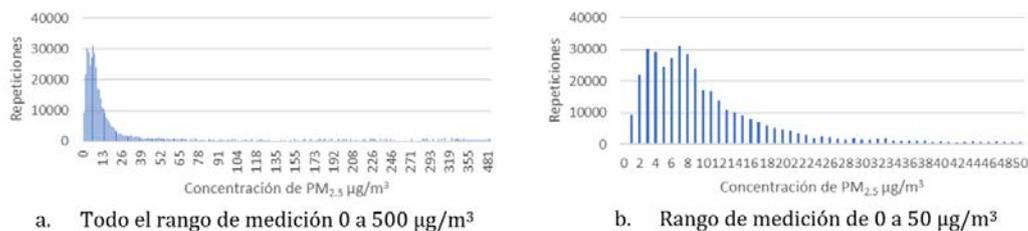


Figura 9. Medición de concentración de $\text{PM}_{2.5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 20 segundos – zona residencial

Se puede observar que el mayor número de repeticiones y a su vez el mayor porcentaje de medición instantánea de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ para la zona residencial fue de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, encontrándola como el mayor concentración en el mes de junio de 2020 equivalente a 8.15% de todos los registros, por otra parte, se tiene que el 90% de los registros del mes de junio están por debajo de $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración de $\text{PM}_{2.5}$, el cual se encuentra por debajo del límite nocivo para la salud de acuerdo a la normatividad Colombiana el cual corresponde a $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.1.2 Medición de concentración de $\text{PM}_{2.5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio por hora – zona residencial

Para la zona residencial y en donde se encuentra la estación de medición de $\text{PM}_{2.5}$, se encuentra ubicada en un conjunto de apartamentos que cuenta con 600 unidades, 160 parqueaderos para vehículos y 200 parqueaderos para motocicletas, situación en donde se puede obtener un incremento de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en diferentes horas del día como se puede apreciar en la Figura 10.

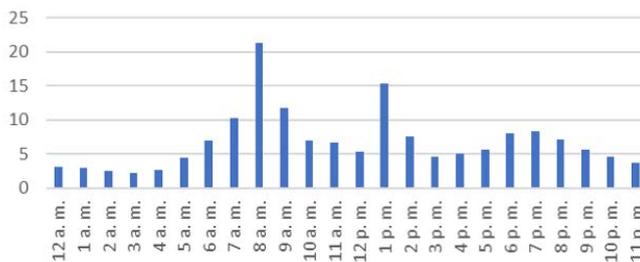


Figura 10. Concentración de $\text{PM}_{2.5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio por hora del día en el mes de junio de 2020 – zona residencial

De acuerdo con la Figura 10, se puede establecer que existen picos de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en el aire del sector, debido al flujo vehicular de los propietarios de automóviles y motocicletas que utilizan estos como medio de transporte para ir a sus lugares de trabajo, como se evidencia, existe una concentración promedio de $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 8 am, la cual es normalmente la hora de salir y dirigirse al trabajo, seguido de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a la 1pm donde las personas llegan a tomar el almuerzo y regresar a sus trabajos, y en menor medida de 6pm a 8pm con concentraciones cercanas a $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, puesto que no todas las personas regresan al mismo tiempo a sus hogares, por otra parte, a pesar de incrementarse los niveles en horas pico de flujo vehicular, este sigue estando por debajo del límite máximo de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.1.3 Medición de concentración de $\text{PM}_{2.5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 24 horas en el mes de junio – zona residencial

Se realizó un análisis de los datos de la concentración de medición de $\text{PM}_{2.5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 24 horas, como se establece en el ICA, con el fin de determinar las excedencias por día de material particulado $\text{PM}_{2.5}$, y tener una referencia de calidad del aire bajo este parámetro, en donde se encontró que en ningún día de la ventana de observación se superó la medida de los $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo de exposición de 24 horas como lo establece la Resolución 2254 de noviembre de 2017, este comportamiento se puede apreciar en la Figura 11.



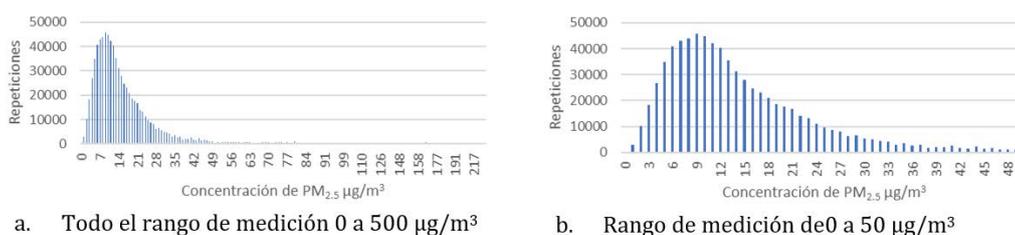
Figura 11. Concentración de $\text{PM}_{2.5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 24 horas en el mes de junio – zona residencial

En la Figura anterior se puede apreciar que existen 3 días en donde se tiene la máxima concentración de $PM_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por día, los cuales corresponden al viernes 5 de junio, jueves 18 de junio y viernes 26 de junio, en los cuales se puede establecer que hay un alto uso de vehículos debido a que son días de pago en la mayoría de las empresas, adicionalmente, se suma que son días de inicio de fin de semana.

3.2 Resultados obtenidos de concentración de $PM_{2.5}$ en la zona no residencial (Sede AUNAR Villavicencio)

3.2.1 Medición de concentración de $PM_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 20 segundos – zona no residencial

Los datos obtenidos en la zona no residencial, en este caso para la sede de la AUNAR Villavicencio se realizó bajo los mismos parámetros de la estación instalada en la zona residencial, con la misma periodicidad de los muestreos cada 20 segundos y la misma cantidad de datos. Para esta estación se obtuvo medidas desde $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $328 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estos últimos valores con repitencia muy baja en la ventana de observación, los cuales no son significativos dentro de todos los 78950 registros como se aprecia en la Figura 12.



a. Todo el rango de medición 0 a $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$

b. Rango de medición de 0 a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 12. Medición de concentración de $PM_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 20 segundos – zona no residencial

Se puede observar que el mayor número de repeticiones y a su vez el porcentaje de medición instantánea de la concentración de $PM_{2.5}$ para la zona no residencial fue de $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, encontrándola como la mayor concentración en el mes de junio de 2020 equivalente a 6.16% de todos los registros, por otra parte, se tiene que el 90% de los registros del mes de junio están por debajo de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración de $PM_{2.5}$, el cual se encuentra por debajo del límite nocivo para la salud de acuerdo a la normatividad Colombiana el cual corresponde a $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.2.2 Medición de concentración de $PM_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio por hora – zona no residencial.

Para la zona no residencial y en la cual se encuentra ubicada la AUNAR sede Villavicencio y la estación de medición de $PM_{2.5}$, se encuentra en medio de la vía Villavicencio – Acacias y Acacias Villavicencio, en donde existe un alto flujo vehicular, además, se encuentra una de las vías principales para la comunicación de la comuna 8 en donde viven una gran población de los estratos 1, 2 y 3, y son una población con gran representatividad laboral para otros sectores de Villavicencio, lo cual se hace importante para su estudio y sus resultados se reflejan en la Figura 13.



Figura 13. Concentración de $PM_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio por hora del día en el mes de junio de 2020 – zona no residencial

Se puede observar que las concentraciones de $PM_{2.5}$ por hora, se incrementa desde las 5am y se mantiene durante las 8 am con un valor promedio de $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, otro hora de interés es a las 12 m donde se tiene una concentración de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para finalizar entre las 6pm y 7pm una concentración de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los cuales representan mayor flujo de vehículos por ser hora pico de ingresos y salidas del trabajo y al medio día como hora para tomar el almuerzo, para finalizar, vale la pena resaltar que a pesar de ser estas horas las de mayor concentración de $PM_{2.5}$ de las mediciones, están por debajo de los $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estipulados en la Resolución 2254 de noviembre de 2017.

3.2.3 Medición de concentración de $PM_{2.5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cada 24 horas en el mes de junio – zona no residencial.

La concentración de $PM_{2.5}$ por día en la zona no residencial presenta un comportamiento de concentración alta en los días 5 de junio, 24 de junio y 25 de junio, días en que la medición estuvo cercana a los $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, vale la pena resaltar que la medición de $PM_{2.5}$ por cada día no bajo de los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que demuestra que siempre hay una concentración de material particulado en la zona debido al flujo de vehículos y por ser una vía que comunica a dos municipios y a su vez a una comuna con el resto de ellas; estas mediciones nunca alcanzaron concentraciones mayores de los $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estipulados en la Resolución 2254 de noviembre de 2017. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 14.

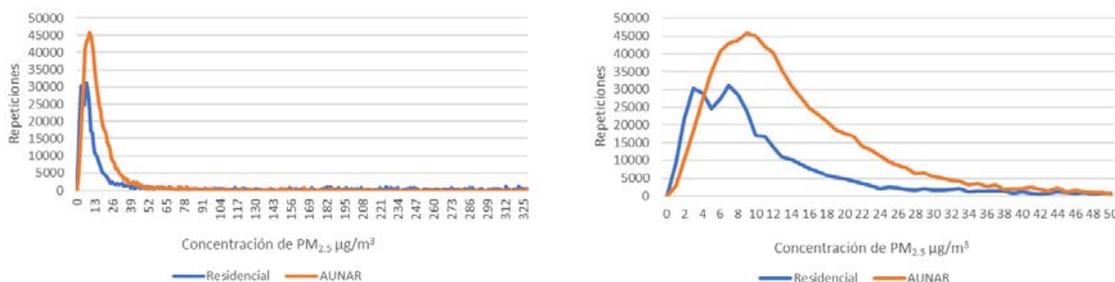


Figura 14. Concentración de PM_{2.5} µg/m³ cada 24 horas en el mes de junio – zona no residencial

3.3 Comparación de valores obtenidos de las estaciones de medición de PM_{2.5} de la zona residencial vs la zona no residencial

3.3.1 Comparación de PM_{2.5} µg/m³ cada 20 segundos – zona residencial vs sede AUNAR Villavicencio

La comparación de las dos zonas tanto la residencial como la no residencial que en este caso es la sede AUNAR Villavicencio, se observa que esta última presenta un incremento en la concentración de material particulado PM_{2.5} mayor que en la zona residencial, sobrepasando de una concentración máxima de 7 µg/m³ a 10 µg/m³ respectivamente, y en otros casos como se aprecia en la Figura 15b. las repeticiones son más altas para los valores de 4 µg/m³ a 14 µg/m³ en comparación con la zona residencial, lo que se presenta en un incremento de la presencia de PM_{2.5} durante mayor tiempo para cada medición.



a. Todo el rango de medición 0 a 500 µg/m³

b. Rango de medición de 0 a 50 µg/m³

Figura 15. Comparación de PM_{2.5} µg/m³ cada 20 segundos – zona no residencial vs sede AUNAR Villavicencio

3.3.2 Comparación de PM_{2.5} µg/m³ promedio por hora – zona residencial vs sede AUNAR Villavicencio

La comparación de la concentración de PM_{2.5} µg/m³ promedio por hora entre la zona residencial y la sede AUNAR Villavicencio, denota un incremento de la concentración promedio por parte de la sede AUNAR Villavicencio, lo anterior se denota un incremento de mínimo de 3 µg/m³ en cada hora del día, hasta incrementos de hasta 7 µg/m³ respecto de la zona residencial, aunque existen dos casos adversos en los cuales se presenta una concentración mayor en la zona residencial que en la sede AUNAR Villavicencio y son las horas de las 8 am y la 1 pm, los cuales se concentra un alto flujo de salida de vehículos de los parqueaderos de la zona residencial por lo tanto las mediciones de PM_{2.5} µg/m³ promedio superan a la sede AUNAR Villavicencio, los datos de comparación se pueden apreciar en la Figura 16.

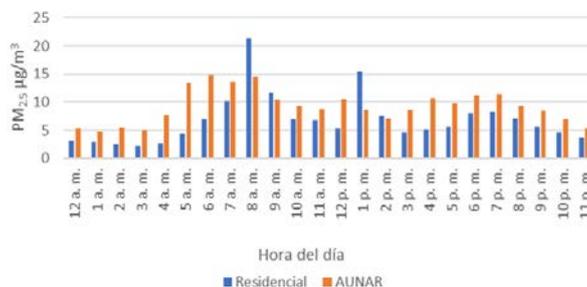


Figura 16. Comparación de PM_{2.5} µg/m³ promedio por hora – zona no residencial vs sede AUNAR Villavicencio

3.3.3 Comparación de PM_{2.5} µg/m³ cada 24 horas en el mes de junio – zona residencial vs sede AUNAR Villavicencio

Las mediciones diarias promedios de PM_{2.5} µg/m³, evidencia un claro incremento de las mediciones de cada día respecto de la zona residencial vs la sede AUNAR Villavicencio (color naranja), superando en la mayoría de días en 3 µg/m³, a excepción de 3 picos en las mediciones que son los días 5 de junio, 18 de junio y 26 de junio que se suponen que hay un incremento de flujo vehicular en la zona residencial debido a las fechas de pago por parte de las empresas, sumándose que son fechas de inicio de fin de semana, por el cual se cree que las se motivan a salir en sus vehículos ya sea para aprovisionarse de víveres o a departir con otras personas, los datos se pueden apreciar en la Figura 17.

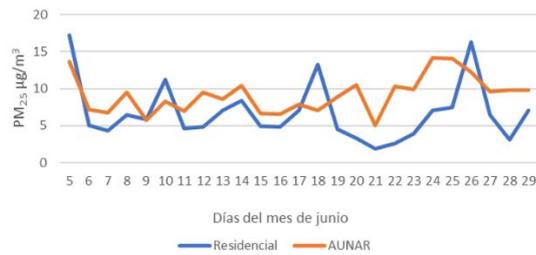


Figura 17. Comparación de PM_{2.5} µg/m³ cada 24 horas en el mes de junio – zona residencial vs sede AUNAR Villavicencio

4. CONCLUSIONES

La medición de calidad del aire es un parámetro importante a medir en cualquier población y más aún cuando en la ciudad no existen medidas actuales ni se cuentan con los quipos de medición en funcionamiento como lo es el caso de la ciudad de Villavicencio, por esta razón es importante mostrar a los dirigentes locales la importancia de la medición de calidad del aire con el fin de prevenir diferentes tipos de enfermedades asociadas a las del aparato respiratorio, además de generar acciones que ayuden a mitigar dicho impacto.

Se hace necesario tener sensores de medición en varios puntos de la ciudad, ya que la calidad del aire y en este caso el material particulado PM_{2.5} se mide por medio de estaciones que cumplan con los parámetros de medición y los cuales tienen una cobertura geográfica limitada, por tal motivo en esta investigación se construyeron dos estaciones para la medición de los datos, una en una zona residencial en donde se esperaba una concentración baja de PM_{2.5} y una en una zona no residencial que en este caso es la sede AUNAR Villavicencio, la cual está ubicada entre las vías principales Villavicencio – Acacias y Acacias Villavicencio, donde normalmente existe un alto flujo vehicular de transporte público, transporte municipal y transporte de carga, lo que motiva a medir los niveles de concentración de PM_{2.5} y verificar si existe un riesgo o no para las personas que permanecen en zonas aledañas al objeto de estudio de este trabajo.

Los valores obtenidos de PM_{2.5} tanto para la zona residencial y la sede AUNAR Villavicencio están por debajo de 37 µg/m³ estipulados en la Resolución 2254 de noviembre de 2017, y no llegan a alcanzar el 70% del valor máximo permitido, lo que indica que a pesar de que hay una presencia de PM_{2.5}, este se encuentra en concentraciones bajas ocasionando un bajo riesgo de adquirir enfermedades relacionadas a este agente contaminante del aire, por otra parte, lo anterior no quiere decir que en la ciudad de Villavicencio no tenga lugares o zonas en donde se pueda presentar una concentración mayor de PM_{2.5} de lo máximo permitido por la reglamentación, para ello se hace necesario instalar más estaciones de medición en puntos de interés con el fin de verificar la calidad del aire en el municipio y si es posible hacer una red de sensores que permita a la comunidad verificar la calidad del aire en cualquier momento, lo anterior teniendo en cuenta que en muchos municipios del país se pueden tener los equipos para la medición pero estos no se encuentran en funcionamiento, o no tienen un plan de mantenimiento que permita su operación bajo los estándares de calidad nacionales e internacionales.

Los resultados obtenidos sobre el PM_{2.5} como única variable no se puede establecer como una única medida de calidad del aire, puesto que el ICA se calcula para seis variables las cuales son O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, SO₂ y NO₂, para ello se necesitan más sensores que cumplan con la medición de dichos parámetros y que cumplan con la norma, para lo cual en algunos casos las universidades tienen el conocimiento y saben aplicar las herramientas para su medición, pero no cuentan con los recursos para adquirir los sensores para su medición, por esta razón se espera compartir este artículo con los mandatarios locales para que se evalúe su pertinencia y a su vez se motiven en apoyar este tipo de proyectos.

Las herramientas que proporciona la empresa MathWorks y en este caso Thingspeak, son de gran valor para desarrollar proyectos de telemetría de datos en tiempo real con equipos de hardware para IoT, además que Thingspeak cuenta con uso de código y graficas de Matlab que ayudan a realizar análisis de la información y correlacionarla, situación que se aprovechara más adelante para cruzar las 8 variables que se están midiendo actualmente con la estación pero que no se tomaron en cuenta en este capítulo, lo que indudablemente será una herramienta muy potente respecto de otras aplicaciones web para IoT que existen en el mercado.

REFERENCIAS

- [1] World Health Organization. (1979). Air monitoring programme design for urban and industrial areas. Organización Panamericana de la Salud, 33(371). 1-46.
- [2] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). Informe Calidad del Aire. Recuperado: <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/59-Resoluci%C3%B3n%20601%20de%202006%20-%20calidad%20del%20aire.pdf>.
- [3] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Protocolo Calidad del Aire. Recuperado: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Resolucion+650+de+2010+-+Adopci%C3%B3n+protocolo+calidad+del+aire.pdf/c8226844-b304-4d0a-89c3-1cf31bece2db>.

- [4] Ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Ajuste Protocolo Calidad del Aire. Recuperado: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Resoluci%C3%B3n+2154+de+2010+-+Ajuste+Protocolo+Calidad+del+Aire.pdf/f6fefeae-d8fa-43d9-993c-9c057e2efe84>.
- [5] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2017). Niveles Calidad del Aire. Recuperado: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire.pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>.
- [6] Datos Abiertos - MinAmbiente. (2020). Datos Calidad del Aire en Colombia 2011 - 2018. Recuperado: www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/DATOS-DE-CALIDAD-DEL-AIRE-EN-COLOMBIA-2011-2018/ysq6-ri4e.
- [7] Hernández, S. et al. (2010). Metodología de la Investigación. McGraw-Hill.
- [8] Rnchal, E. (2016). Estudio e implantación de un sistema ERP en una empresa. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Barcelona.
- [9] Wemos. (2019). Wemos D1 mini. Recuperado: https://docs.wemos.cc/en/latest/d1/d1_mini.html.
- [10] Plantower. (2015). Plantower. Recuperado: <http://www.plantower.com/en/content/?108.html>.

Modelo de toma de decisiones para la evaluación de la contribución a la sostenibilidad social de las mezclas asfálticas

Verena Maldonado Flores
Leonardo Andrés Sierra Varela
Universidad de La Frontera
Chile

Limitados son los estudios en proyectos de infraestructura vial que consideran la contribución a la sostenibilidad social y aún menos en temáticas específicas como el uso de mezclas asfálticas. Estudios como el del Inter-American Development Bank [1] respaldan los limitados aspectos que se consideran para el desarrollo de proyectos de infraestructura actualmente, restando importancia a los materiales utilizados, uso de recursos escasos, consideraciones de salud, seguridad entre otros. Actualmente la evaluación del desarrollo sostenible en un proyecto de infraestructura se focaliza en los aspectos medioambientales y económicos, subestimando la incidencia del aspecto social, sin embargo, la evaluación social es un marco global determinante en la sostenibilidad de un proyecto, esta abarca la evaluación de todos los impactos sobre los seres humanos y su interacción con su entorno sociocultural, económico y biofísicos [2]. Esta investigación propone un estudio de evaluación de la contribución social de seis mezclas asfálticas a emplear en caminos y carreteras en zona centro y sur de Chile. Estas mezclas poseen características diferenciadoras entre sí, a causa de sus materias primas, que en parte de ellas son de características eco sustentable. Las mezclas asfálticas evaluadas corresponden a: Mezcla convencional, mezclas semi caliente con Zeolita natural, mezcla semi caliente con ligante asfáltico sintético, también mezcla semi caliente con reciclado 20% y 30% que incorporan zeolita natural, mezclas semi caliente con reciclado 20% y ligante asfáltico sintético. Para lograr evaluar la contribución social de cada una de las mezclas, se utilizó un modelo de toma de decisión basado en redes Bayesianas, y un análisis multicriterio. Para esto se establecieron criterios sociales aplicables a un contexto, considerando el ciclo de vida basado en tres etapas; extracción, producción y colocación de estas mezclas. Con ello se seleccionaron indicadores de medición, obteniendo información de respuesta a ellos en base a revisiones documentales, visitas de campo y entrevistas a especialistas relacionados con el área de estudio. El estudio refleja la diferencia en contribución social por parte de mezclas asfálticas, su aporte y la incidencia sobre cada actor de interés al corto y largo plazo. Los resultados y metodología de este capítulo pueden ser utilizada en otras evaluaciones, que pueden ser complementadas con otras condiciones de contexto u otros criterios, determinando la mejor decisión para la utilización de materias primas diferenciadoras.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto IDEA/CONYCID, denominado *Desarrollo y Diseño de Mezclas Asfálticas de Mayor Eficiencia Energética y Bajo Impacto Ambiental*, se requiere el desarrollo de un estudio de la evaluación de la sostenibilidad social. El objetivo de este estudio es la evaluación de la potencial contribución social que generan las mezclas desarrolladas dentro del alcance del proyecto. Estas mezclas fueron desarrolladas en las instalaciones de la planta asfáltica de BITUMIX, Maipú. Las mezclas evaluadas presentan características diferenciadoras, a causa de la procedencia de sus materias primas, algunas de ellas eco sustentable o variación en los procesos productivos y de instalación. Las mezclas evaluadas son seis: WMAR30z, WMAR20z, WMAR20e, WMAe, WMAz y HMA.

Para evaluar la contribución social de cada una de las mezclas, se utilizó un modelo de toma de decisión basado en un Análisis Multicriterio y operacionalizado a través de Redes Bayesianas y un modelo Noisy-OR. Para esto se estableció un modelo de toma de decisiones basado en criterios sociales aplicables a un contexto y considerando el ciclo de vida de las mezclas asfálticas en tres etapas: extracción, producción y colocación. Para cada criterio social se determinaron indicadores de medición, en base a una revisión de la documentación, visitas de campo y entrevistas a especialistas relacionados con el área de estudio. Este estudio refleja la diferencia de contribución social de las mezclas asfálticas, el aporte de cada una y la incidencia sobre cada actor de interés, que interviene en su ciclo de vida. Los resultados y metodología de este trabajo son válidos para el contexto nacional y la información técnica disponibles de las mezclas asfálticas evaluadas.

2. MÉTODO

La Figura 1 representa el plan de trabajo del estudio, estructurado en cuatro fases metodológicas. Cada fase comprende diversas técnicas de investigación y sus resultados que son insumos para las fases siguientes.

2.1 Exploración

La exploración es la fase I de esta investigación. En esta fase se recopila información de revisiones documentales y visitas de campo al lugar de extracción del mineral zeolita. Esta visita de campo se lleva a cabo por cinco días en mayo del 2019 por tres integrantes del grupo de investigación, esto se realiza a las dependencias de la empresa FERTOSA en la localidad de Quinamávida, comuna de Colbun, Región del Maule. A partir de esta visita el equipo investigación, extrae registros fotográficos que respaldan condiciones de contexto (Figura 2 y 3). Se aplican entrevistas semi-estructuradas a trabajadores, vecinos de la Empresa productora del mineral, también a representante de la municipalidad de Colbun. Esto permite identificar la importancia e influencia del mineral en la zona, frente a un posible aumento de demanda. También se visita el campo de prueba de las mezclas asfálticas en dependencias de la Empresa Bitumix en la comuna de Maipú.

Con la información recopilada de entrevistas a investigadores del proyecto, personal de planta de producción y visita de campo, el equipo de investigación determina los aspectos sociales preliminares que aplican al estudio. El conjunto de criterios sociales determina los aspectos de medición de la contribución social para cada mezcla asfáltica evaluada. Adicionalmente se identifican sub-criterios sociales, que son aquellos aspectos intermedios que se ven afectados por los resultados de indicadores, e impactados sobre otro criterio de mayor envergadura y relevancia global. Finalmente se establecen indicadores de medición, que son seleccionados de acuerdo a su aplicabilidad e importancia para el criterio que busca medir. Se tiene en consideración que los indicadores pueden ser medidos de manera cuantitativa o cualitativamente según la información disponible y lo que se pretende medir [3]. De esta forma, criterio, sub-criterio e indicador, mencionados constituyen los aspectos diferenciadores de impacto social positivo (contribución) que conforman un modelo de toma de decisión conceptual de causa-efecto preliminar.

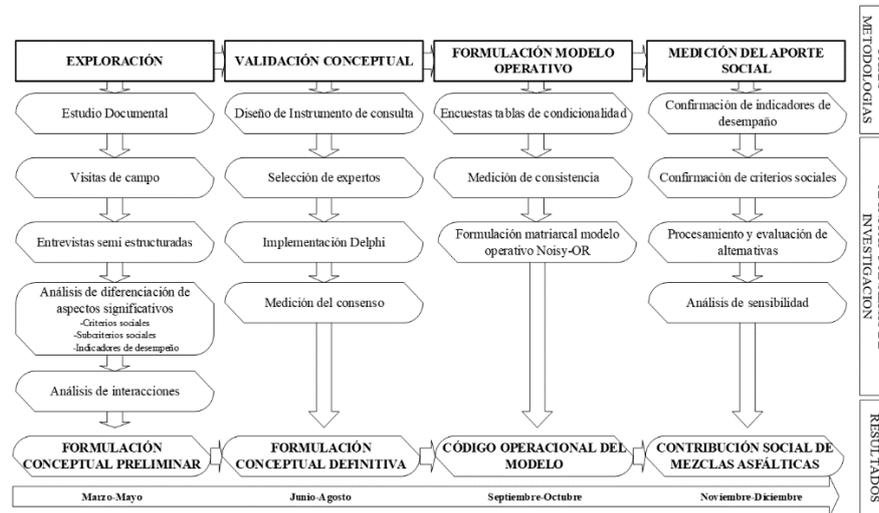


Figura 1. Plan de trabajo de la Evaluación de la Contribución social de las eco mezclas asfálticas

2.2 Validación conceptual

La fase II se realiza con base en la conformación preliminar de conceptos, resultado de la fase I. En esta fase se validan los conceptos del modelo de toma de decisión, a través de un panel conformado por ocho especialistas del ámbito. En la Tabla 1 se muestra las características multidisciplinarias del panel de especialistas que participan en el estudio, además esto se acompaña con el proceso para la validación del modelo de toma de decisiones en Figura 2. La validación se determina a través del grado de consenso por parte de los especialistas participantes por medio de la aplicación de la técnica Delphi [4].

Tabla 1. Panel de especialistas

	Institución que representa	Profesión	Ámbito de aporte
1	Laboratorio Nacional de Vialidad	Ingeniero Constructor	Normativo
2	Contraloría General de la República	Ingeniero Constructor	Económico
3	Universidad de La Frontera	Ingeniero Constructor	Técnico
5	Universidad de La Frontera	Ingeniero Constructor	Técnico
4	Universidad de La Frontera	Ingeniero Constructor	Técnico
6	Universidad de La Frontera	Ingeniero Constructor	Social
7	Universidad de La Frontera	Ingeniero Constructor	Técnico
8	Ministerio de Obras Públicas	Ingeniero Constructor	Técnico

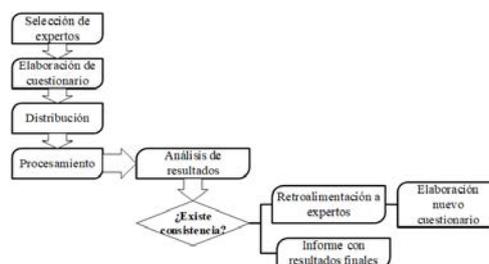


Figura 2. Proceso de validación de conceptos

2.3 Formulación modelo operativo

En la fase III se da operatividad al modelo de toma de decisión a través de la formulación de la red bayesiana. La influencia de la interacción entre criterios, sub-criterios e indicadores es determinada a través de las tablas de condicionalidad. Las tablas de condicionalidad son determinadas a través de la aplicación de encuestas a un nuevo

grupo de especialistas. Los perfiles de estos especialistas consideran representantes del ámbito público y privado. Para la aplicación de las entrevistas prevé que los aspectos a ser evaluados por cada especialista sean acordes a sus conocimientos y especialidad, cuidando además que cada indicador sea respondido a lo menos por cinco perfiles diferentes. En la Figura 3 se muestra la estructura tipo de tabla de condicionalidad aplicada al estudio y las instrucciones consideradas en la encuesta.

INDICADOR	CRITERIO		
	Impacto Visual (negativo)		
Cantidad de áridos naturales usados por Tonelada de mezcla	Alto	Medio	Bajo
	Def: Se considera una disminución de explotación de áridos naturales por la incorporación de RAP a la mezcla asfáltica.		
950 - 855 kg	100	0	0
855 - 760 kg	80	20	0
760 - 665 kg	50	25	25

Definición aclaratoria del indicador
Impacto o Consecuencia

Causa Probable
Espacio de respuesta del experto

Figura 3. Instrumento tipo conformado por tablas de condicionalidad aplicado a especialistas

Cada especialista encuestado identifica la probabilidad de incidencia de cada categoría de un indicador sobre el nivel de impacto de un criterio o subcriterio. Obtenidas las respuestas por cada especialista se determina la mediana y consistencia de los valores de un indicador. Posteriormente, para evaluar la confiabilidad de los resultados se aplica el método de concordancia de Kendall a un 95% de nivel de confianza. Este es un coeficiente no paramétrico, que se puede usar cuando no aplica el supuesto de distribución normal de las variables y mide la consistencia de la relación de variables cualitativas ordinales. Corresponde además a una de las pocas herramientas simples para la medición del acuerdo ente especialistas [5]. Un coeficiente de Kendall ronda de 0 a 1, siendo 1 la valoración que representa mayor concordancia.

Las probabilidades de incidencia obtenidas del panel de especialistas permiten formular una red Bayesiana a través de un modelo Noisy-OR, que es una herramienta que permite desarrollar modelos canónicos, estableciendo la mayor contribución posible, a partir de todas las combinaciones probables de incidencia, según la información obtenida en el modelo de toma de decisión. Esto permite realizar predicciones con alto nivel de acierto. Para aplicar este modelo canónico se trabaja con software de programación Matlab R2015. La Figura 4 representa la secuencia de pasos desarrollados para formular el código del modelo de contribución social de cada mezcla asfáltica.

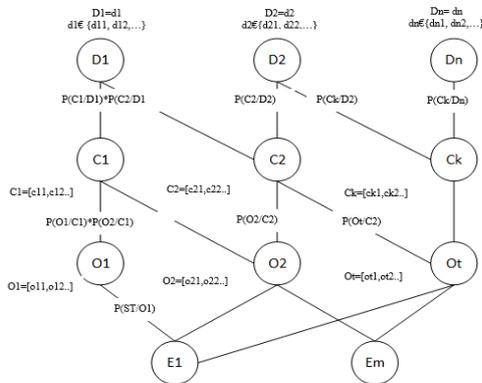


Figura 4. Secuencia probabilística del modelo

Del esquema es posible inferir la red de probabilidad como se presentan; en ecuación (1) la ocurrencia de sub-criterios C según respuesta de indicadores D predecesores. En ecuación (2) la ocurrencia de criterios O , según resultados de sub-criterios antecesores. En ecuación (3) la probabilidad de ocurrencia de la esperanza media E , resultante de cada criterio. En ecuación (4) la ocurrencia de la esperanza media resultante para un criterio en consideración de la sumatoria de sub-criterios dependientes, y por último en ecuación (5) la esperanza media normalizada resultante.

$$P(C2 = c21|D1 = d1; D2 = d2) = 1 - P(C2 = c21|D1 \neq d1) * P(C2 = c21|D2 \neq d2) = 1 - [1 - P(C2 = c21|D1 = d21)] * [1 - P(C2 = c21|D2 = d2)] \quad (1)$$

$$P(O2 = o21|C1 = c11; C2 = c21) = 1 - P(O2 = o21|C1 \neq c11) * P(O2 = o21|C2 \neq c21) = 1 - [1 - P(O2 = o21|C1 = c11)] * [1 - P(O2 = o21|C2 = c21)] \quad (2)$$

$$P(Em = em1|O2 = o21; Ot = ot1) = 1 - P(Em = em1|O2 \neq o21) * P(Em = em1|Ot \neq ot1) = 1 - [1 - P(Em = em1|O2 = o21)] * [1 - P(Em = em1|Ot = ot1)] \quad (3)$$

$$P(Em = em1) = \sum_{Czi} \sum_{Ckt} P(LT = em1O2 = o2i; Ot = ott) \quad (4)$$

$$P(Em) = \sum_a em_a * P(Em = em_a) \quad (5)$$

Finalmente, se consiguen las esperanzas medias de contribución para cada criterio social evaluado, que el aporte social de acuerdo a todas las combinaciones posibles procesadas en el modelo en red. Para esto se emplea una escala de puntuación de 1 a 9 siguiendo a [5] por la valoración de atributos. Este método de puntuación ha sido usado con éxito en otras investigaciones, tales como [2].

2.4 Medición del aporte social

En la fase IV se determina que la contribución social de cada mezcla asfáltica, corresponde a la suma de áreas de contribución generadas por la puntuación de esperanzas medias de cada criterio social. Esto se aplica a la evaluación general de cada mezcla y también de forma parcial para cada etapa del ciclo de vida (extracción, producción, colocación). A través del área de contribución social para cada etapa del ciclo de vida (extracción, producción y colocación) se compararon a través del cálculo de distancias a un punto ideal. Para el cálculo de distancias se emplean tres métodos de contraste, que han sido utilizados en estudio de Arriagada (2015) [6], los que se muestran en Tabla 2. De forma gráfica es posible representar la diferencia entre las tres, como se muestra en la Figura 5.

Tabla 2: Métodos de distancias utilizados.

En primer lugar, se encuentra la Distancia euclídea, la cual se define como la distancia en línea recta existente entre dos puntos. Esta forma de cálculo se representa en ecuación (6).	$D_{euc}(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{r=1}^p (x_{ir} - x_{jr})^2} \quad (6)$
En segundo lugar, se encuentra la distancia de Chebyshev la cual se describe como la mayor de las diferencias entre dos puntos en un espacio vectorial, a lo largo de cualquier dimensión de sus coordenadas [7]. La Ecuación (7) representa la distancia de Chebyshev.	$D_{chev}(i, j) = \max_k x_{ik} - x_{jk} \quad (7)$
En tercer lugar, la distancia de Manhattan corresponde a la distancia de la suma de sus diferencias entre sus correspondientes componentes [7]. La Ecuación (8) representa el modo de cálculo de la distancia de Manhattan.	$D_{man}(x, y) = \sum_{i=1}^k x_{ik} - x_{jk} \quad (8)$

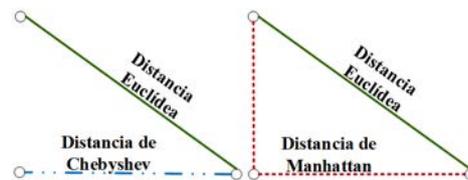


Figura 5. Representación de distancias geométricas

Para analizar la estabilidad del modelo se aplica un análisis de sensibilidad. Para ello se reevalúa el modelo, variando los valores iniciales de cada criterio e indicador en rangos sistemáticos, manteniendo constante el resto. La importancia de un análisis de sensibilidad radica en el hecho de que los valores que se han considerado para la evaluación pueden tener variaciones con efectos sobre los resultados [8]. La evaluación del proyecto puede ser sensible a uno o más parámetros, si cuando se emplea uno, la decisión o tendencia inicial cambia. Si esto no sucede en ningún caso, se dice de un modelo robusto, por lo tanto, la distribución posterior a un parámetro desconocido no es significativamente afectada por la variación [9].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir de las primeras dos fases de la investigación se obtienen 25 indicadores de desempeño que miden 13 sub-criterios y 9 criterios sociales. A partir de ellos se configuran relaciones de causa, esquematizados a través un modelo de toma de decisiones y operativizado como una red bayesiana. El modelo de toma de decisión es representado en la Figura 6. Esta red de toma de decisión se obtiene a partir del consenso de especialistas que validan los criterios, sub-criterios e indicadores y sus interacciones en la fase II. Frente a esto, los resultados del consenso se resumen en una primera ronda con un 38% de aprobación absoluta, mientras que, en la segunda ronda con modificaciones al modelo de toma de decisión de acuerdo a las observaciones sugeridas por especialistas, se obtiene el 100% de aprobación.

En base al modelo de toma de decisión de la Figura 6 son diseñadas las tablas de condicionalidad consultadas a especialistas en la fase III. Las probabilidades de incidencia de las tablas de condicionalidad determinan el grado de incidencia de las interacciones del modelo de toma de decisión. Un análisis de concordancia de Kendall es aplicado para validar la consistencia y coherencia entre las probabilidades de interacciones consultadas a especialistas. Valor de significancia (p-valor) menor a 0,05 reflejan un alto grado de concordancia mientras que en casos que superan este valor muestran la diferencia de apreciación expresada entre especialistas.

Las incidencias de las tablas de condicionalidad, los estados de respuesta de cada indicador, los criterios y sub-criterios son formulados a través de un código en Software Matlab para dar operatividad al modelo. Esto se representa en la Tabla 3 donde cabe destacar que aquellos conceptos destacados corresponden a Criterios sociales, que son consecuencia directa de los respectivos indicadores por lo cual no existe un sub-criterio intermedio para estos casos particulares. Para el caso de la Tabla 4, relación sub-criterio-criterio, se considera como estado de respuesta común para todos los casos: Alto, Medio, Bajo.

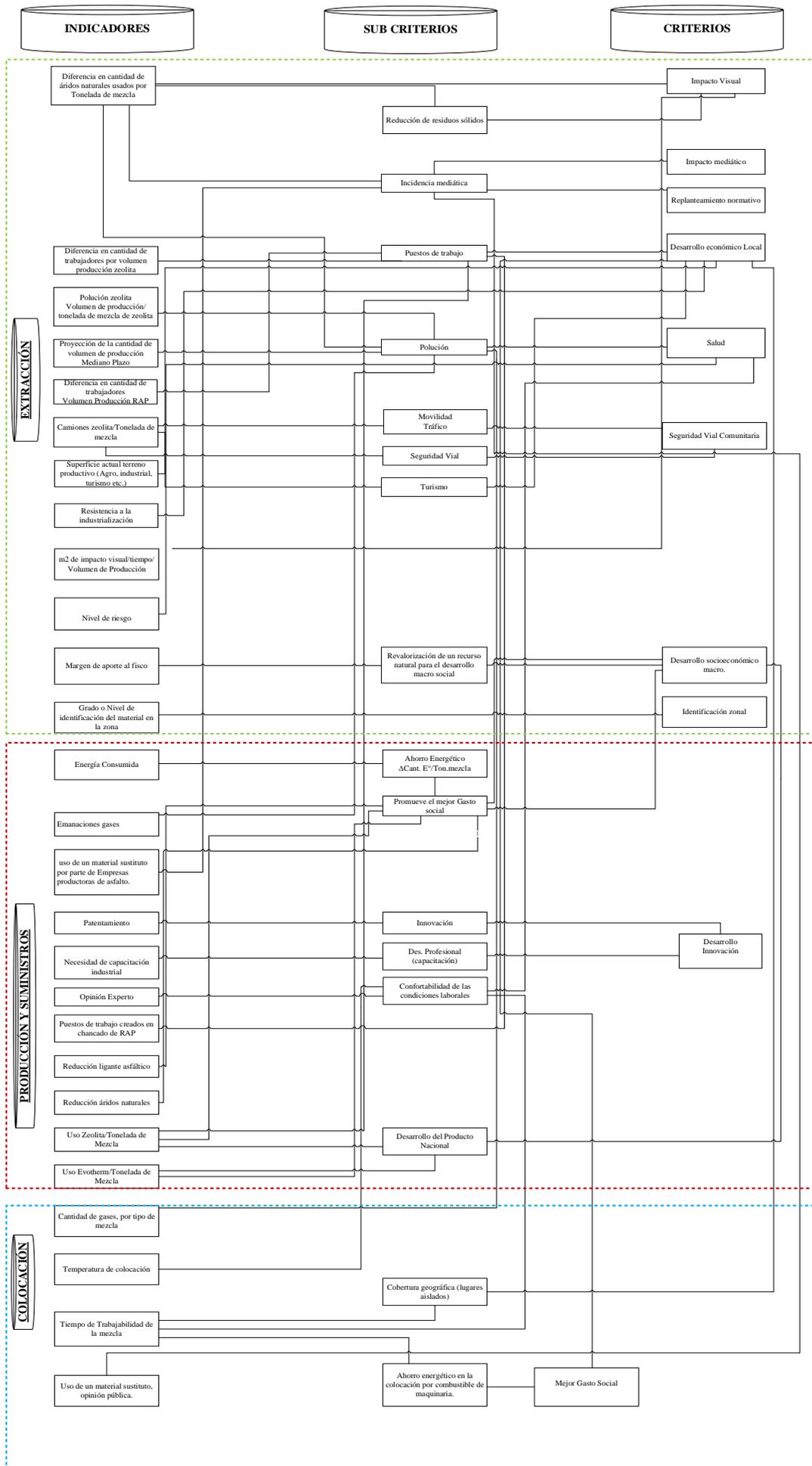


Figura 6. Modelo de toma de decisión en base a Red Bayesiana

Tabla 3. Grado de concordancia entre indicadores y sub-criterios

D	Indicador	Estado de respuesta del indicador	C	Sub-criterio	W de Kendall	P valor
1	Cantidad de áridos naturales usados por Tonelada de mezcla	Alto: 750-650kg; Medio: 850-750; Bajo: 950-850 kg	1	Reducción de residuos sólidos	0,768	0,021
			3	Influencia sobre el medio	1	0,024
			2	Incidencia mediática	1	0,05
			7	Polución	0,958	0,018
			13	Promueve el mejor Gasto social	0,625	0,035
2	Magnitud de Impacto Visual	Alto:8-6; Medio 6-4; Bajo 4-2	1	Contribución al Paisaje	1	0,024
3	Impacto sobre Superficie actual terreno productivo	Alto: 18-9; Bajo 9-0	4	Desarrollo Socioeconómico Local	0,958	0,018
4	Grado de resistencia a la Industrialización	Alto; Medio; Bajo	4	Desarrollo Socioeconómico Local	0,818	0,03
5	Trabajadores por producción zeolita	Alto: 10-20; Bajo 0-10	4	Puestos de trabajo	0,818	0,04
6	Trabajadores por extracción RAP	Alto: 1-2; Bajo 0-1			0,818	0,03
7	Camiones zeolita	Alto:0-3cam; Bajo:3-6cam.	5	Turismo	1	0,05
			9	Movilidad Tráfico	0,6805	0,05
			10	Seguridad Vial	0,6805	0,05
8	Polución zeolita	Alto:10 mg/m3; Bajo: 0 mg/m3	7	Polución	0,9645	0,021
9	Volumen de producción Mediano Plazo	Alto 1000-2000T; Bajo: 0-1000T			0,767	0,093
10	Nivel de Riesgo	Alto: Aceptable; Medio: Moderado; Bajo: Critico	5	Salud	0,818	0,025
11	Margen de aporte público	Alto:0.100-0.150UF;Medio:0.05-0.100UF;Bajo:0-0.05UF	11	Revalorización de un recurso natural para el desarrollo macro social	0,705	0,06
12	Grado o nivel de identificacion del material en la zona	Alto; Medio; Bajo	8	Identificación Zonal	1	0,018
13	Energía Consumida	Alto:59-50kWh;68-59kWh;77-68kWh	13	Promueve el mejor Gasto social	1	0,027
14	Reducción ligante asfáltico	Alto:10-20kg;5-10kg;0-5kg			1	0,018
15	Uso Zeolita	Alto:3-6kg;0-3kg			0,6295	0,050
16	Uso Evotherm	Alto:0-3kg; Bajo: 3-5kg Alto:0-3kg; Bajo: 3-5kg	14	Desarrollo del Producto Nacional	0,6295	0,040
			13	Promueve el mejor Gasto social	0,705	0,05
17	Emanaciones gases	Bajo; Medio; Alto.	7	Polución	0,95	0,009
18	Condiciones Laborales	Alto; Medio; Bajo	8	Confortabilidad laboral	0,929	0,024
19	Uso de un material sustituto.	Alto; Medio; Bajo	2	Incidencia mediática	1	0,024
			3	Influencia sobre el medio	1	0,024
					1	0,024
20	Patentamiento	Alto: Sí ; Bajo: No	15	Innovación	0,725	0,04
21	Capacitación industrial	Alto:2-4; Bajo 0-2	16	Des. Profesional (capacitación)	0,725	0,04
22	Trabajo por chancado de RAP	Alto: 1-2; Bajo 0-1	4	Puestos de trabajo	0,818	0,04
23	Gases, por tipo de mezcla	Bajo; Medio; Alto.	7	Polución	0,929	0,024
24	Diferencia en Temperatura de colocación	Alto:15-20°C;Medio:10-15°C;Bajo:0-10°C	8	Confortabilidad laboral	0,929	0,024
					0,705	0,05
25	Tiempo de Trabajabilidad de la mezcla	Alto:7-9min;4-7min;2-4min	12	Ahorro Energético (Compactación)	1	0,027
			13	Promueve el mejor Gasto social	1	0,018
			6	Cobertura geográfica	1	0,018
				Media	0,85	0,05

Tabla 4. Grado de concordancia entre sub-criterios y Criterios

C	Sub-criterio	Estado de decisión	O	Criterio	W de Kendall	valor p
1	Reducción de residuos sólidos	Alto; Medio; Bajo	1	Contribución al Paisaje	0,939	0,004
2	Incidencia mediática	Alto; Medio; Bajo	2	Impacto mediático	0,326	0,04
3	Influencia sobre el medio	Alto; Medio; Bajo	3	Replanteamiento normativo	1	0,05
4	Puestos de trabajo	Alto; Medio; Bajo			0,717	0,04
5	Turismo	Alto; Medio; Bajo	4	Desarrollo Socioeconómico Local	0,942	0,023
6	Cobertura geográfica (lugares aislados)	Alto; Medio; Bajo			0,778	0,04
7	Polución	Alto; Medio; Bajo	5	Salud	0,939	0,06
8	Confortabilidad de las condiciones laborales	Alto; Medio; Bajo			0,939	0,03
9	Movilidad Tráfico	Alto; Medio; Bajo	6	Seguridad vial comunitaria	0,964	0,003
10	Seguridad Vial	Alto; Medio; Bajo			0,768	0,021
11	Revalorización de un recurso natural para desarrollo macro social	Alto; Medio; Bajo			1	0,05
12	Ahorro Energético (Compactación)	Alto; Medio; Bajo			0,84	0,015
13	Promueve el mejor Gasto social	Alto; Medio; Bajo	7	Desarrollo socioeconómico	0,929	0,024
14	Desarrollo del Producto Nacional	Alto; Medio; Bajo			0,76	0,022
15	Innovación	Alto; Medio; Bajo	9	Desarrollo innovación	1	0,05
16	Des. Profesional (capacitación)	Alto; Medio; Bajo			1	0,05
				Media	0,83	0,05

A partir de la operación del modelo en Matlab se obtiene la contribución social generada de cada mezcla asfáltica que constituye el resultado de la cuarta fase del proceso de investigación. Desde un enfoque de ciclo de vida es posible agrupar la contribución social de acuerdo a los criterios que aplican sobre extracción, producción, colocación respectivamente. La contribución social se representa por áreas calculadas en base a gráficos radiales que constituyen por cada criterio social y su puntuación obtenida de las esperanzas medias del modelo para cada producto evaluado.

Del procedimiento de cálculo de áreas de contribución social, se representa en Figura 7 alternativas en un espacio tridimensional de contribución social. De esta forma cada punto representa una mezcla asfáltica su contribución social en la etapa de extracción (eje x), producción (eje y) y colocación (eje z). A partir de esto se determinan las distancias desde un punto de referencia (punto de origen) a objeto de determinar la máxima contribución social. Este

procedimiento se realiza aplicando distancia euclídea, distancia de Manhattan y distancia de Chebyshev, los resultados se muestran en Tabla 5.

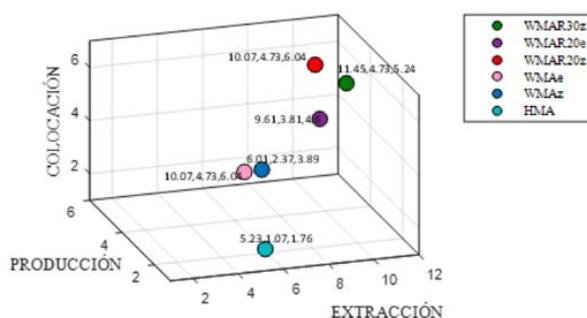


Figura 7. Contribución social en un espacio tridimensional

Tabla 5. Contribución social por medio de métodos de distancias

Tipo de Mezcla	Distancia Euclidiana	Distancia de Manhattan	Distancia de Chebychev
WMAR30z	13,45	21,41	10,45
WMAR20e	11,32	18,02	8,61
WMAR20z	12,66	20,83	9,07
WMAe	6,95	11,51	4,24
WMAz	7,54	12,26	5,01
HMA	5,621	8,06	4,23

A partir de los resultados obtenidos se determina que las mezclas WMAR30z y WMAR20z son aquellas que presentan una mayor contribución social en el proyecto. La mezcla WMAR20e posee características que también le proporcionan buena puntuación en la contribución social. Sin embargo, en este caso, es el criterio de Desarrollo Socioeconómico Macro el que limita su contribución en la etapa de producción. En la etapa de producción el Desarrollo Socioeconómico Macro se vincula con el origen de los insumos y el aporte nacional. La mezcla WMAR20e requiere de un ligante asfáltico de nombre comercial *Evotherm* de origen extranjero y que implica un costo adicional del 10% sobre el costo del ligante convencional [3]. Además, se genera una dependencia del producto que no se considera desarrollo para un país [10].

Entre las mezclas que no presentan incorporación de árido reciclado (WMAz, WMAe, HMA), sobresale WMAz. Esta mezcla presenta una contribución significativa por los indicadores de: identificación zonal, margen de aporte público y puestos de trabajo creados, de la etapa de extracción. La Tabla 6 representa el aporte de cada mezcla, de acuerdo la suma de puntuación de contribución social transversalmente durante el ciclo de vida del producto.

Tabla 6. Contribución social sobre partes interesadas

Tipo de Mezcla	Comunidad	Trabajadores	MOP	MDS	Operarios y laboratoristas	Empresa productora de asfalto	Industria Asfalto	MMA	Comunidades aisladas	Total
WMAR30z	28,6	23,8	36,0	19,1	14,7	14,7	8,1	10,8	11,5	167,2
WMAR20e	25,3	17,9	27,9	18,9	12,2	12,2	5,7	8,1	12,6	140,7
WMAR20z	26,9	17,4	34,3	23,8	14,7	14,7	8,1	10,8	12,6	163,2
WMAe	20,2	14,0	23,6	14,2	11,0	11,0	4,0	8,1	11,5	117,7
WMAz	28,3	13,8	23,6	15,3	13,3	13,3	6,4	8,1	11,5	133,5
HMA	20,2	12,9	15,9	12,9	8,9	8,9	4,0	3,4	8,0	95,1

A partir de lo que se indica en la Tabla 6, la mezcla WMAR30z es la que mayor contribución social aporta a las partes interesadas. En adición se puede observar que las partes interesadas con mayor contribución social en el ciclo de vida completo son el Ministerio de Obras Públicas y trabajadores. Mientras que la comunidad presenta una alta contribución solo considerada para la etapa de extracción.

Desde otro punto de vista, los criterios con mayor contribución social en su ciclo de vida son: Contribución al paisaje, Desarrollo e Innovación, Incidencia Mediática, Salud y Desarrollo Socioeconómico Local. En todos estos casos la mezcla WMAR30z es la que más contribuye, especialmente en el caso del criterio de contribución al paisaje, convirtiéndose este en un aspecto de trascendencia a la hora de priorizar las mezclas. Debido a su gran incidencia y nivel de riesgo sobre más de un aspecto social evaluado. Caso aparte es el criterio de Salud en el que las mezclas WMAR20e y WMAR20z presentan mayor contribución en el ciclo de vida. Esto se debe al limitado efecto de la temperatura de fabricación, colocación y trabajabilidad, sumado a la alta incidencia de la polución y su alto nivel de riesgo asociado en la etapa de extracción.

A partir de los análisis anteriores de este estudio se presenta el diagrama de Ishikawa de la Figura 8, que muestra características diferenciadoras de las mezclas evaluadas respecto a la mezcla convencional (HMA). Finalmente se aplica un análisis de sensibilidad sobre cada criterio social constituyente del modelo. Esto se desarrolla determinar la

estabilidad del modelo, dentro del alcance del contexto del estudio. La tabla 7, presenta la variación de la contribución social de forma numérica sobre cada mezcla, al aplicar una alteración de un al 90% sobre cada criterio social, manteniendo proporcionalmente constante el resto. Debido a que la tendencia de contribución entre las mezclas no cambia, se asume la estabilidad del modelo para los casos estudiados.

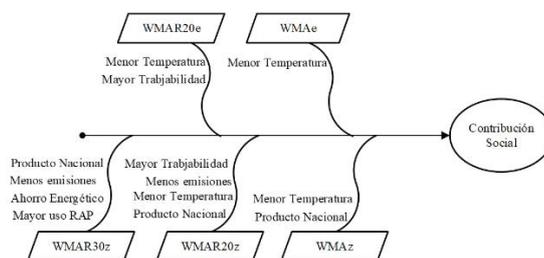


Figura 7. Diagrama de Ishikawa de los aspectos diferenciadores que inciden en la contribución social

Tabla 7. Análisis de Sensibilidad del modelo

% variación	1. Contribución al paisaje	2. Impacto Mediático	3. Replanteamiento normativo	4. Desarrollo Socioeconómico Local	5. Salud
90%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F
60%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F
30%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F
15%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F
0%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F
-15%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F
-30%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F
-60%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F
-90%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F
% variación	6. Seguridad Comunitaria	7. Desarrollo Socioeconómico Macro	8. Identificación Zonal	9. Desarrollo e Innovación	
90%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	
60%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	
30%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	
15%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	
0%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	
-15%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	
-30%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	
-60%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	
-90%	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	A,C,B,E,D,F	

Considerada para la secuencia:

A: WMAR30z	C: WMAR20z	E: WMAz
B: WMAR20e	D: WMAe	F: HMA

Así también se desprende del análisis de sensibilidad, que el Criterio *Salud* es quien más incide en la cercanía en la contribución social entre las mezclas WMAR30z y WMAR20z. No obstante, la mezcla WMAR30z es priorizada en todos los casos de variación.

4. CONCLUSIONES

Se determinó el grado de contribución social de las seis mezclas asfálticas evaluadas, de acuerdo a sus características y contexto de procedencia, las mezclas asfálticas de mayor contribución social son; mezcla semi caliente con 30% de RAP y zeolita, mezcla semi caliente con 20% de RAP y zeolita, mezcla semi caliente con 20% de RAP y Evotherm, mezcla semi caliente con zeolita, mezcla semi caliente con Evotherm y mezcla caliente patrón.

Las relaciones entre los parámetros identificados (Criterios, sub-criterios e indicadores) se establecen a través una red de toma de y un análisis multicriterio aplicado a través de la teoría de redes Bayesianas. Este modelo permite priorizar socialmente la contribución de las mezclas asfálticas. El modelo de toma de decisión, es estable para el conjunto de alternativas evaluadas.

Así también los aspectos de diferenciación que impactan sobre la contribución social son: Contribución al paisaje, Desarrollo e Innovación, Desarrollo Socioeconómico Macro, Salud y Desarrollo Socioeconómico Local.

Por su parte las partes interesadas más beneficiadas son la Comunidad, trabajadores y el Ministerio de Obras Públicas. Esto es consistente con el interés propuesto por el Ministerio, a través de estrategias impulsadas para alcanzar el desarrollo sostenible en proyectos de infraestructura pública, siendo estas estrategias las que se relacionan con los criterios sociales evaluados en esta investigación.

Finalmente, en consideración que son limitadas las investigaciones de sostenibilidad social que abarcan la evaluación específica de tipos de material asfálticos como los evaluadas. Este trabajo podría ser replicado para evaluaciones de características similares, pudiendo complementarse con mayores alcances, en contextos diferentes, consiguiendo nuevos resultados acorde al contexto de evaluación. En definitiva, este estudio aporta bases metodológicas para evaluar la contribución social generada por productos innovadores.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento del proyecto IDeA FONDEF ID 15120235, también a las personas, empresas y organismos interesados en este proyecto: Bitumixsur, Fertosa y Ministerio de Obras Públicas, que conformaron el panel de especialistas.

REFERENCIAS

- [1] Inter-American Development Bank. (2018). Evaluación de la sostenibilidad de proyectos de infraestructura en Chile por medio de Envision. GIZ.
- [2] Sierra, L., Yepes, V. y Pellicer, E. (2017). Assessing the social sustainability contribution of an infrastructure project under conditions of uncertainty. *Environmental Impact Assessment Review*, 67, 61-72.
- [3] Badia, D. (2012). Metodología de los mapas de concordancia para la estratificación de variables cuantitativas: Aplicación a la asignatura de medidas electrónicas. *Universitat Ramon Llull*.
- [4] Hallowell, M. y Gambatese, J. (2010). Qualitative research: Application of the delphi method to CEM research. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1), 99-107.
- [5] Saaty, T. (1980). Analytic hierarchy process. *The SAGE Dictionary of Quantitative Management Research*, 9-12.
- [6] Arriagada, M. (2015). Comparación de métricas de distancia en el algoritmo K-Vecinos más cercanos para el problema de reconocimiento automático de dígitos manuscritos. *Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*.
- [7] García, S. (2014). Distancias geométricas entre píxeles. *Universidad Don Bosco*.
- [8] Ojeda, J et al. (2014). Análisis de la sensibilidad paramétrica del proceso de producción de ciclo-trimetileno-triamina. *Inf Technol.*, 25(4), 153-162.
- [9] Fernández, G. et al. (2003). El analisis de la robustez y la ayuda a la decision multicriterio discreta. *Universidad San Pablo-CEU*.
- [10] Castillo, M. (2011). Política Económica: Crecimiento económico, desarrollo económico, desarrollo sostenible. *Revista Internacional del Mundo Económico y del Derecho*, 3, 1-12.

Caracterización numérica y experimental de edificaciones construidas mediante el sistema túnel

Carlos Felipe Orduz Suárez¹
William Valencia-Mina²
Álvaro Viviescas Jaimes¹
Édison Osorio Bustamante³
¹Universidad Industrial de Santander
²Universidad del Quindío
³Universidad Antonio Nariño
Colombia

La construcción de edificaciones altas se ha popularizado en Bucaramanga - Colombia, en respuesta a la creciente demanda de vivienda en esta ciudad, debido a las limitaciones en el uso del suelo, además de su costo. El sistema estructural más empleado para estas construcciones es el de muros de carga. Sin embargo, el uso del sistema túnel, orientado a reducir costos y tiempos de construcción, sumado a la falta de límites claros en el Reglamento Colombiano de construcción Sismorresistente NSR-10, respecto al espesor mínimo de muros, ha llevado a que hoy se encuentren numerosas edificaciones con muros con espesores menores a los 15cm. Eventos sísmicos ocurridos en la última década en Chile (2010) y Nueva Zelanda (2011) evidenciaron fallas no esperadas en edificaciones de muros con características similares e incluso con espesores superiores y mejor detallados que los normalmente empleados en Bucaramanga. Teniendo en cuenta lo anterior y considerando la alta sismicidad de la ciudad, el Grupo de Investigación en Estructuras y Materiales de Construcción INME de la Universidad Industrial de Santander, con el apoyo de la Universidad del Quindío y la Universidad Antonio Nariño, adelanta un proyecto orientado a caracterizar de forma numérica y experimental la respuesta de edificaciones de muros construidas mediante el sistema túnel típicas de Bucaramanga. En el marco de ese proyecto, se presentan aquí los resultados de un estudio de dieciocho edificaciones con estas características. Se encontró que la totalidad de los muros de estas estructuras corresponden a elementos esbeltos con comportamiento dominado por la flexión. A partir de este estudio, se propone un muro con las características típicas de estas edificaciones. Adicionalmente, se presentan los resultados de un análisis numérico por el Método de Elementos Finitos de un muro de CR disponible en la literatura, empleando distintas discretizaciones. Se encontró que, aunque para derivas por debajo del 1% la respuesta de las distintas discretizaciones se asemeja a los resultados experimentales, luego de este punto, la rigidez del modelo con la discretización más finas sufre pérdidas severas. De acuerdo con esto, se recomienda el uso de discretizaciones de entre 30 cm y 45 cm para el modelo del muro.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de edificaciones altas en las principales ciudades de Colombia ha aumentado en las últimas dos décadas como respuesta a la creciente demanda de vivienda, frente a la limitación en el uso del suelo, además de su costo. De acuerdo con información del Censo de Edificaciones [1], esta tendencia inició en la década del 2.000, y desde entonces el número de apartamentos construidos cada año en Colombia supera al de casas, dando como resultado que solo el año pasado esta diferencia haya sido de seis veces aproximadamente (Figura 1). En cuanto al sistema estructural más empleado para este propósito, la información del Censo de Edificaciones apunta al sistema de muros de carga, mediante el uso del sistema industrializado, también llamado túnel (Figura 2).

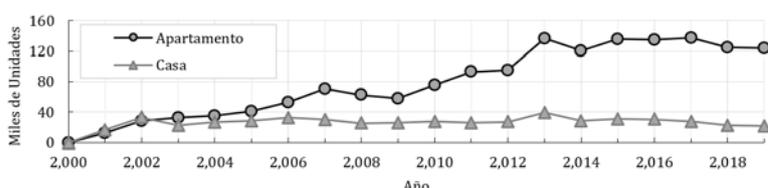


Figura 1. Unidades de vivienda nuevas en Colombia por destino [1]

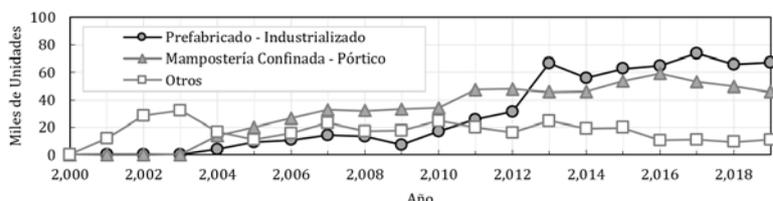


Figura 2. Apartamentos nuevos en Colombia por sistema constructivo [1]

Una edificación con sistema túnel se compone por muros y losas de Concreto Reforzado (CR) fundidos de forma monolítica, cuyo refuerzo es suministrado generalmente por medio de mallas de acero electro-soldado [2]. La resistencia lateral ante cargas sísmicas es proporcionada por los muros del sistema, que se encargan, además, de soportar las cargas verticales de la estructura. El sistema túnel ha sido ampliamente usado en Colombia, cuyo territorio se encuentra un 85% en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta, de acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10 [3]. La popularidad de este sistema se debe principalmente a dos factores: el primero es su gran rigidez lateral [4], que representa menores desplazamientos en comparación con otros sistemas estructurales; y el segundo es la reducción de los tiempos y costos de construcción frente a otros

sistemas constructivos. Sin embargo, prácticas comunes de la industria, orientadas a minimizar estos tiempos y costos, además de la falta de límites claros acerca del espesor mínimo de los muros en la NSR-10, han ocasionado que en la actualidad se encuentren edificaciones altas de muros con espesores menores a los 15cm.

En el caso de Bucaramanga, el escenario no es distinto al del resto del país. Esta ciudad se encuentra localizada en zona de amenaza sísmica alta, y en las últimas décadas ha experimentado un notable aumento en el número de edificaciones altas (de quince a veinte pisos) construidas con muros delgados mediante el sistema túnel (Figura 3 y Figura 4). Esto ha llamado la atención de la comunidad académica local, luego de los sismos ocurridos en Chile, el 27 de febrero de 2.010 (Mw de 8.8 [5]) y Nueva Zelanda, el 22 de febrero de 2.011 (Mw de 6.2 [6]), donde se evidenciaron modos de falla no esperados en edificaciones de muros con características similares e incluso mejores a los empleados normalmente en Bucaramanga.



Figura 3. Cambio en el panorama de Bucaramanga (A) 1.960, (B) 2.011. [<https://www.gentedecabecera.com/2011/11/asi-lucia-el-sector-hace-50-anos/>]

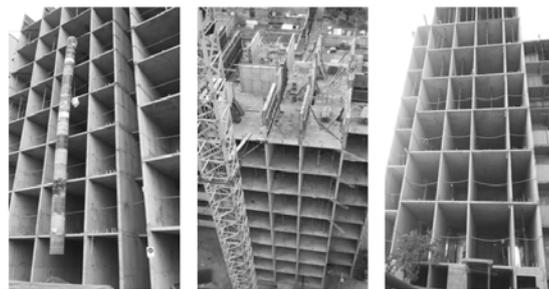


Figura 4. Edificaciones de muros delgados de CR construidas mediante el sistema túnel en Bucaramanga

Debido a estos sismos, numerosas investigaciones se han adelantado alrededor del mundo con el fin de estudiar el sistema de muros de carga, para determinar las causas de las fallas y proponer modificaciones a los códigos de diseño y construcción de países con riesgo sísmico similar.

En ese sentido, en Chile, Rojas et al. [7] realizaron un estudio en edificaciones con alturas de entrepiso de entre 2.2 y 2.5m y muros de entre 15 y 25cm de espesor, concluyendo que el principal tipo de falla se generó por efectos de compresión y tensión en los niveles inferiores de las estructuras, donde se presentó el aplastamiento del concreto debido a grandes esfuerzos de compresión (Figura 5A), además del pandeo y la fractura del acero de refuerzo (Figura 5B). Los autores proponen revisar los requerimientos de confinamiento de los elementos de borde y estudiar el comportamiento de estructuras de muros de CR ante sismos de gran intensidad y duración, para analizar la fatiga en el concreto y el acero de refuerzo, así como la reducción de la rigidez de los muros debidas a cargas cíclicas. En ese mismo país, Westenenk et al. [8] atribuyen los daños observados, entre otras razones, a las irregularidades en planta y altura de las edificaciones, los altos niveles de esfuerzos de compresión, la falta de confinamiento en los elementos de borde y los reducidos espesores de los muros, que dificultan su adecuado refuerzo y confinamiento. Producto de esta investigación, se recomienda limitar la carga axial y el espesor mínimo de los muros.



Figura 5. Fallas en muros de CR - Chile y Nueva Zelanda: (A) aplastamiento del concreto, (B) pandeo del refuerzo, (C) pandeo fuera del plano del muro [7, 9]

En Nueva Zelanda, Wallace [9] identificó un tipo de falla recurrente en muros con secciones transversales en T y L, típicas en edificaciones de muros de CR. De acuerdo con el autor, estos muros presentaron pandeo fuera del plano cuando la demanda de ductilidad debida a ciclos de tracción y compresión superó la capacidad en los extremos libres de los muros (Figura 5C). Sritharan et al. [10] proponen limitar el espesor mínimo de los muros para controlar este tipo de falla, además de revisar las cuantías mínimas de refuerzo longitudinal.

Por su parte en Colombia [11], a partir de un programa experimental de cuatro muros de CR con espesor de 10cm y refuerzo consistente en una única capa de malla de acero electro-soldado, encontraron que la capacidad de disipación de energía de estos elementos no corresponde con los factores de reducción de fuerza sísmica (R) especificados en la NSR-10. Los autores estudiaron una base de datos de veintiocho edificaciones de muros delgados de CR en Armenia, Colombia, de entre cinco y 18 pisos [12]. Sin embargo, considerando que las edificaciones de muros construidas mediante el sistema túnel en Bucaramanga, tienen generalmente entre 15 y 20 pisos y emplean en el refuerzo de sus muros dos o más capas de malla de acero electro-soldado, no existen estudios particulares sobre el comportamiento de estas estructuras. Por esta razón, el Grupo INME de la Universidad Industrial de Santander, con el apoyo de la Universidad del Quindío y la Universidad Antonio Nariño, adelanta un proyecto de investigación orientado a caracterizar de forma numérica y experimental la respuesta de edificaciones de muros construidas mediante el sistema túnel típicas de Bucaramanga. El presente documento recoge parte de los resultados de ese proyecto.

2. MARCO REFERENCIAL

Muros de CR son empleados en edificaciones con este sistema estructural para soportar las cargas tanto verticales como laterales. El refuerzo típico consiste en mallas de acero electro-soldado; sin embargo, cuando se requiere, se suministra refuerzo adicional en los extremos del muro mediante elementos de borde compuestos por barras confinadas con estribos. En la Figura 6 se muestra la configuración típica de un muro de CR. Los requerimientos de diseño para estos elementos en Colombia están en la NSR-10 y se presentan en la Tabla 1.

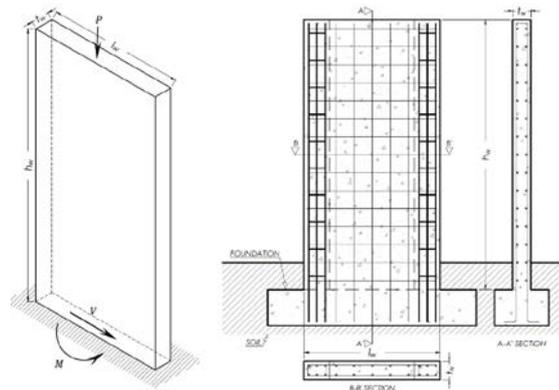


Figura 6. Configuración típica de un muro de CR

Tabla 1. Requerimientos de diseño para muros de CR, de acuerdo con la NSR-10 [13]

Altura máxima	Tabla A.3-1	Zona de Amenaza sísmica alta	DES	50m
		Zona de Amenaza sísmica media	DMO	50m
		Zona de Amenaza sísmica baja	DMI	50m
Cuantía mínima vertical	C.14.3.2	Si $V_u \leq 0.083A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$ $\rho_l \geq \frac{0.0012 \text{ si } d_b \leq 16\text{mm (no. 5) o malla electro-soldada}}{0.0015 \text{ si } d_b > 16\text{mm (no. 5)}}$		
	C.21.9.2.1	Si $V_u > 0.083A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$ → $\rho_l = \rho_t = 0,025$		
Cuantía horizontal mínima	C.14.3.3	Si $V_u \leq 0.083A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$ $\rho_t \geq \frac{0.0020 \text{ si } d_b \leq 16\text{mm (no. 5) o malla electro-soldada}}{0.0025 \text{ si } d_b > 16\text{mm (no. 5)}}$		
	C.21.9.2.1	Si $V_u > 0.083A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$ → $\rho_l = \rho_t = 0,025$		
Distribución de refuerzo	C.14.3.4	Una malla si $t_w < 250\text{mm}$ Dos mallas si $t_w \geq 250\text{mm}$		
	C.21.9.2.3	Si $V_u > 0.17A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$ → dos capas de refuerzo		
Espaciamiento máximo	C.14.3.5 C.21.9.2.1	$s_x, s_y < \min(3t_w \text{ o } 450\text{mm})$		
Confinamiento	C.14.3.6	No se requiere si $\rho_l < 0.01$ o el refuerzo vertical como refuerzo a compresión		
Espesor mínimo de muro	C.14.5.3.1	$t_w > \frac{\min(h_w, l_w)}{25}$ 10cm		
Elemento de borde	C.21.9.6.2	Zonas de compresión reforzadas con elementos de borde donde: $c \geq \frac{l_w}{600 \left(\frac{\delta_u}{h_w} \right)}$		$\frac{\delta_u}{h_w} \geq 0.007$

De acuerdo con Paulay y Priestley [14], una edificación de muros de CR se comporta ante cargas laterales de forma similar a una viga en voladizo en posición vertical (Figura 7). Por su parte, Alcocer [4] clasifica los muros en dos grupos principales según su geometría: los que son controlados por corte y por flexión. Los primeros son aquellos cuya relación de aspecto ($a_r = h_w/l_w$) es menor a dos. En estos muros la resistencia a la flexión es mayor que al corte, y su falla ocurre cuando los esfuerzos cortantes superan la capacidad del concreto y el acero de refuerzo horizontal, produciéndose así grietas en diagonal a lo largo del muro (Figura 8A). Por su parte, los muros controlados por flexión son aquellos que tienen una relación de aspecto mayor a dos y su resistencia al corte es mayor que la de flexión. En este caso la falla ocurre cuando los momentos en el muro generan esfuerzos a compresión en el concreto mayores a su resistencia y se produce su trituración y posterior pandeo del refuerzo longitudinal, si no se encuentra debidamente confinado (Figura 8B).

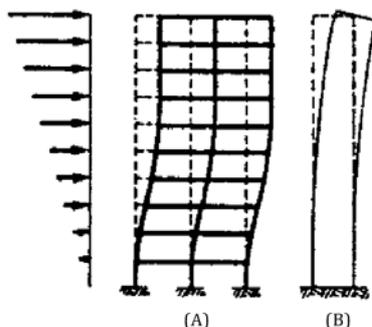


Figura 7. Respuesta estructural ante carga lateral: (A) pórtico, (B) muro [4]

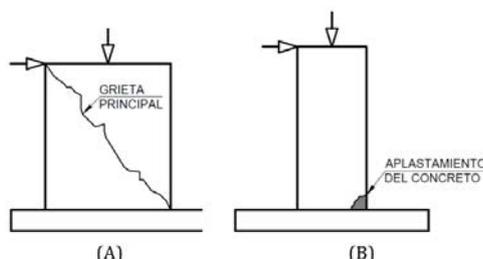


Figura 8. Fallas en muros según su relación de aspecto: (A) corte, (B) flexión [4]

Otro tipo de falla, asociada a la flexión en muros delgados de CR, es el pandeo inelástico fuera del plano (debe diferenciarse este del pandeo fuera del plano determinado típicamente mediante la carga crítica de Euler). En esta falla, se presenta el desplazamiento del muro fuera de su plano, que es distinto al pandeo del refuerzo longitudinal [15]. De acuerdo con Wallace [9], el pandeo inelástico fuera del plano ocurre cuando la demanda de ductilidad en el muro, ocasionada por ciclos sucesivos de tracción y compresión, supera su capacidad de deformación. Este tipo de falla ha sido estudiada mediante enfoques analíticos por Paulay y Priestly [14] y Chai y Elayer [16], y enfoques numéricos por medio del MEF por Parra [17], y Dashti [18], entre otros.

3. MÉTODO

El primer modelo empleado para el análisis de elementos de CR fue el elemento viga-columna de dos componentes, propuesto en 1.965 por Clough et al. [19]. Desde entonces, y gracias al aumento de la capacidad de cálculo de los computadores, se han desarrollado modelos capaces de incorporar numerosas variables que inciden en la respuesta de estos elementos. De acuerdo con Galal y El-Sokkary [20], un muro de CR puede modelarse mediante macro- y micro-modelos. Los primeros emplean simplificaciones del comportamiento de los materiales, son relativamente fáciles de implementar y han demostrado una precisión razonable en la predicción de la respuesta histerética de muros de CR [21, 22]. Por su parte, los micro-modelos se basan en el MEF y permiten modelar de forma detallada el comportamiento de los materiales; sin embargo, debido a que demandan grandes esfuerzos computacionales, se emplean usualmente para el estudio de elementos estructurales individuales.

El análisis de elementos de CR por el MEF inició en 1.967 con Ngo y Scordelis [23], quienes propusieron un modelo lineal elástico para el análisis de vigas de CR. Los autores representaron el concreto y el acero por medio de elementos triangulares con deformación constante, conectados a través de elementos de enlace para incorporar el efecto de deslizamiento concreto-acero. Posteriormente, Nilson [24] propuso un elemento cuadrilátero con propiedades no-lineales de los materiales y los elementos de enlace y empleó un modelo no-lineal de carga incremental, en el que el agrietamiento se produce cuando uno de los elementos alcanza su resistencia a tracción. Cuando esto ocurre, el análisis es detenido y la estructura redefinida para ser cargada nuevamente. Por su parte, Franklin [25] empleó un modelo no-lineal para incorporar de forma automática el agrietamiento y la redistribución de esfuerzos en la estructura. Esto permitió el análisis continuo de la respuesta de pórticos y muros de CR acoplados, desde el inicio de la carga, hasta la falla del sistema.

De acuerdo con Albornoz [26], un elemento de CR se modela por el MEF mediante el uso de elementos membrana, shell y sólido. En el elemento membrana, a cada nodo se le asignan dos grados de libertad y es empleado comúnmente para representar el estado plano de esfuerzo (Figura 9A). El elemento shell incorpora el comportamiento fuera del plano al considerar cinco grados de libertad por nodo: tres de desplazamiento y dos de rotación (Figura 9B). El elemento sólido se usa para el estudio del estado de esfuerzo tridimensional y se le asignan tres grados de libertad de desplazamiento por nodo (Figura 9C). Elementos membrana y shell han sido usados para el estudio de muros de CR [27–30]; sin embargo, la falta de modelos constitutivos de los materiales en tres dimensiones y la alta demanda de capacidad de procesamiento que implica, ha generado que el elemento sólido sea menos usado para este propósito.

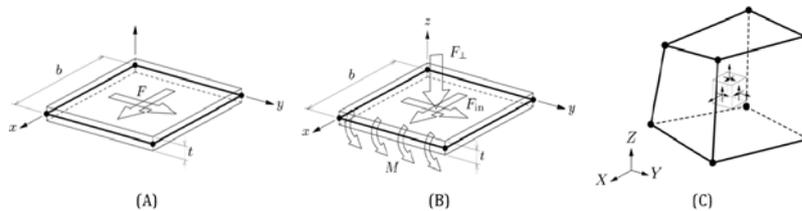


Figura 9. Tipos de elementos finitos: (A) membrana, (B) shell, (C) sólido [31]

El refuerzo en el MEF se incorpora por medio de tres modelos: discreto, embebido y distribuido. En el primero, el refuerzo es representado por elementos axiales tipo barra (Figura 10A). A través de este modelo se puede incorporar el deslizamiento concreto-acero, usando elementos de interfaz [23, 24]. En el segundo modelo el refuerzo se representa por medio de barras individuales embebidas en los elementos de concreto, sin grados de libertad independientes (Figura 10B). Las deformaciones del refuerzo se determinan a partir del campo de desplazamiento del elemento que lo contiene [32]. Por último, el refuerzo distribuido se asume de manera uniforme en los elementos de concreto (Figura 10C), la cantidad de refuerzo se especifica como una fracción del volumen del elemento que lo contiene. Las matrices constitutivas del concreto y el acero se superponen para obtener una única matriz del CR [33].

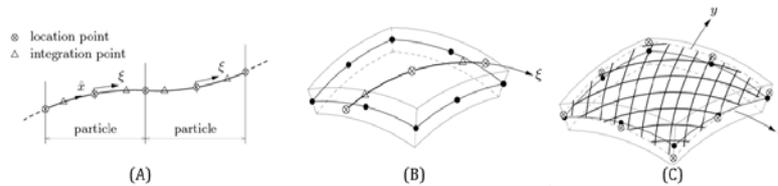


Figura 10. Tipos de refuerzo: (A) discreto, (B) embebido, (C) distribuido [31]

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se estudiaron dieciocho edificaciones de quince a veinte pisos de muros de CR construidas mediante el sistema túnel en Bucaramanga, con alturas de entre 38 y 50m y entrepisos de 2.4 a 2.6m. Como resultado, se obtuvieron las características comunes de los muros que conforman estas edificaciones. Se encontró que la totalidad de los muros son controlados por flexión, con relaciones de aspecto superiores a tres (Figura 11A) y relaciones de corte (M/Vl_w) principalmente superiores a 2 (98%) (Figura 11B).

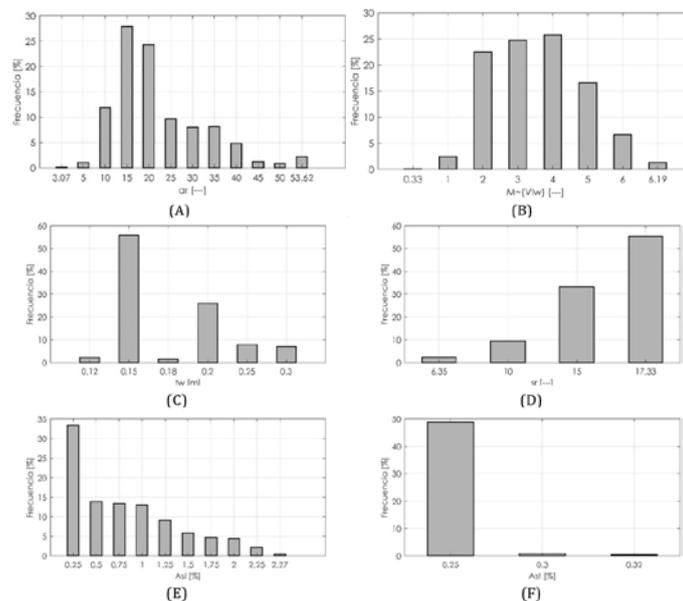


Figura 11. Distribución de frecuencia de las características de los muros: (A) relación de aspecto, (B) relación de corte, (C) espesor, (D) relación de esbeltez, (E) cuantía de refuerzo longitudinal, (F) cuantía de refuerzo transversal

El espesor típico de estos muros es de 15cm, con una frecuencia de 56% (Figura 11C), dando como resultado relaciones de esbeltez ($s_r = h_w/t_w$) superiores a 6 (Figura 11D). En cuanto a las cuantías de refuerzo tanto longitudinal como transversal, se encontró que todos los muros cumplen con las disposiciones de la NSR-10 de cuantía mínima de 0.25% (Figura 11E y 11F).

A partir de estas características y considerando las capacidades disponibles en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad industrial de Santander, se seleccionaron las propiedades del muro INME-RW1 (Figura 12), representativo de la ciudad de Bucaramanga, con el fin de evaluar su respuesta de forma numérica y experimental ante carga cíclica reversible en el plano. Este muro tiene 90cm de longitud, 1.85m de altura y espesor de 15cm, con relaciones de aspecto y de corte de 2.1 y relación de esbeltez de 12.3. Se escogió una resistencia del concreto de 21MPa y refuerzo mediante dos capas de malla de acero electro-soldado de 648MPa de 7mm de diámetro cada 15cm en dirección tanto horizontal como vertical, equivalentes a cuantías de 0.34%. El diseño del muro fue realizado por Parra y González [34].

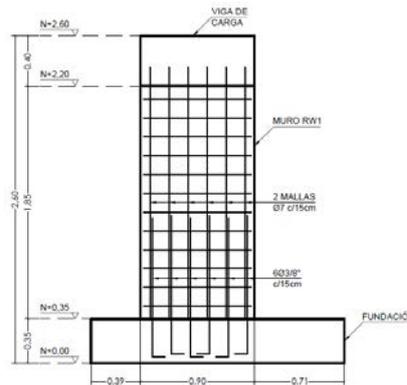


Figura 12. Muro INME-RW1 [34]

Con el propósito de calibrar un modelo mediante el MEF, se empleó el software DIANA para modelar el muro RW2 (Figura 13) de Thomsen y Wallace [35]. Se emplearon elementos Q20SH para el concreto y un modelo embebido para el refuerzo (Figura 14A). El elemento Q20SH (Figura 14B) es un shell curvo con cuatro nodos, que permite el estudio de desplazamientos fuera del plano del muro [31]. Para el concreto se empleó el modelo de Mander et al. [36] para compresión y el modelo de Hsu y Belarbi [37] para tracción (Figura 15A y Figura 15B). Para el acero se empleó el modelo de Menegotto y Pinto [38] (Figura 16). En la Tabla 2 se presentan las propiedades de los materiales.

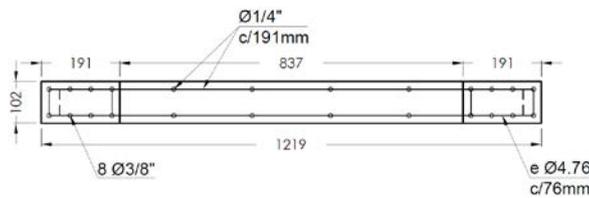


Figura 13. Sección transversal muro RW2 [35]

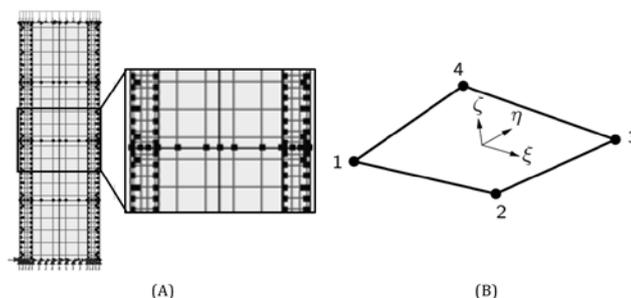


Figura 14. Modelo del muro RW2 en DIANA: (A) geometría, (B) elemento Q20SH [31]

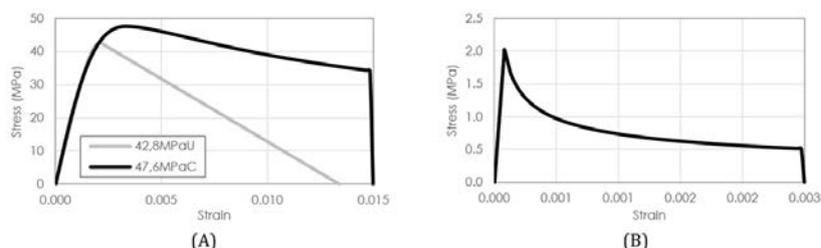


Figura 15. Modelo para concreto: (A) compresión, (B) tracción [36, 37]

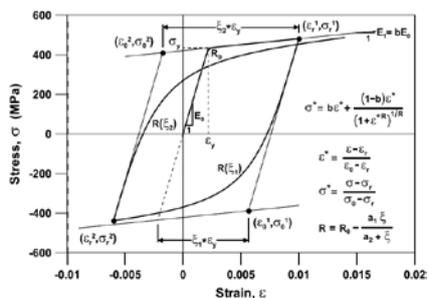


Figura 16. Modelo para acero [39]

Tabla 2. Propiedades de los materiales

Concreto	Compresión	E_c	31.030 MPa
		f'_c	42.80 MPa
	Tracción	ϵ_c	2.1 E-03 mm/mm
		f_t	2.03 MPa
Acero		E_s	200 GPa
		f_y	648 MPa
		R_0	20
		a_1	18.5
		a_2	1.5 E-03

Con el fin de evaluar la incidencia de la discretización del modelo en su respuesta, se realizó el análisis para tres tamaños de elementos distintos, de 45, 30 y 10cm (Figura 17). En cuanto a las fuerzas aplicadas, se utilizó una carga axial de 386kN (7% de relación de carga axial). Además, se tuvo en cuenta el peso propio del muro. Para la fuerza lateral, se aplicó el protocolo de desplazamiento propuesto por los autores Thomsen y Wallace [35] (Figura 18).

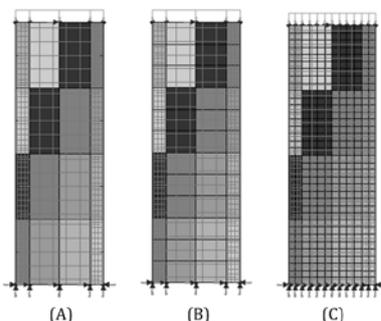


Figura 17. Discretizaciones empleadas: (A) 60cm, (B) 30cm, (C) 10cm

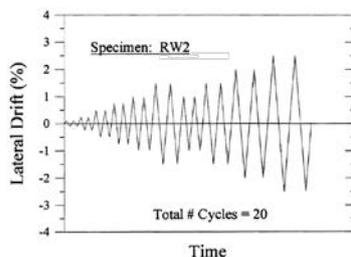


Figura 18. Protocolo de desplazamiento [35]

En la Figura 19 se presentan las curvas de fuerza-desplazamiento obtenidas a partir del modelo del muro para las diferentes discretizaciones empleadas, además de la curva experimental reportada por los autores.

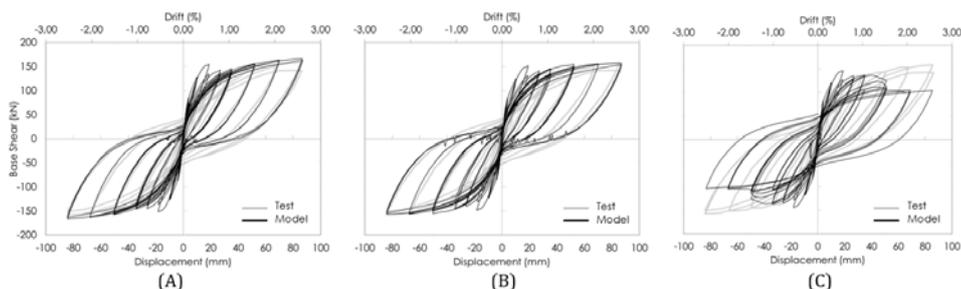


Figura 19. Curva de fuerza-desplazamiento para las diferentes discretizaciones: (A) 45cm, (B) 30cm, (C) 10cm

De acuerdo con estas curvas, se puede concluir que, en términos generales, la respuesta del modelo se asemeja a los resultados experimentales. Sin embargo, aunque la respuesta para derivas inferiores al 1% es similar para las tres discretizaciones, a partir de este punto, se observa que para la discretización de 10cm hay una pérdida severa de rigidez del modelo luego de este punto. Por esta razón, se recomienda discretizar el modelo del muro INME-RW1 empleando tamaños de elementos de entre 30 y 45cm.

5. CONCLUSIONES

Se estudiaron las principales características geométricas y estructurales de edificaciones altas de muros de CR construidas mediante el sistema túnel en Bucaramanga, mediante el análisis estadístico de la información de dieciocho de estas edificaciones. Se encontró que la totalidad de los muros estudiados corresponden a elementos esbeltos, dominados por flexión con altas relaciones de aspecto y esbeltez. El espesor más común de estos muros es de 15cm, aunque el mínimo encontrado fue de 12cm. En cuanto al refuerzo, la totalidad de los muros cumplen con las cuantías mínimas establecidas por la NSR-10. A partir de estas características, se diseñó el muro INME-RW1 para su ensayo ante carga cíclica reversible en el plano.

Se realizó el análisis numérico del muro RW2, mediante el MEF en el software DIANA. Se emplearon diferentes discretizaciones para evaluar la incidencia de esta en la respuesta del modelo. Se encontró para los tres casos valores similares de la rigidez inicial; sin embargo, para la discretización de 10cm se presentó una pérdida de capacidad del modelo, a partir de una deriva del 1%. De acuerdo con estos resultados, se recomienda discretizar el modelo del muro INME-RW1 empleando elementos de entre 30 y 45cm.

Se espera calibrar el modelo por el MEF, a partir de los resultados del ensayo experimental del muro INME-RW1, con la intención de obtener una herramienta numérica capaz de captar los distintos modos de falla de muros de CR en edificaciones altas construidas mediante el sistema túnel en Bucaramanga, incluyendo el pandeo inelástico fuera del plano, cuando este sea el predominante según las características del muro.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, por la financiación de este trabajo a través del proyecto de investigación Estudio del Comportamiento Sísmico de Edificaciones Tipo Túnel en Zonas de Alta Amenaza Sísmica - Fase 1. A la Universidad Industrial de Santander, la Universidad del Quindío y la Universidad Antonio Nariño por su apoyo en la ejecución del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] DANE (2020). Censo de edificaciones. Recuperado: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/censo-de-edificaciones>.
- [2] Carrillo, J. y Alcocer, S. (2013). Shear strength of reinforced concrete walls for seismic design of low-rise housing. *ACI Structural Journal*, 110(3), 415-426.
- [3] AIS. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- [4] Alcocer, S. (1994). Comportamiento y diseño de estructuras de concreto reforzado - muros estructurales. En 1er Curso Seguridad Sísmica de las Construcciones para Directores Responsables de Obra. México, México.
- [5] Earthquake Engineering Research Institute. (2010). The Mw 8.8 Chile earthquake of february 27, 2010. Recuperado: https://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2010_pdf/Chile10_insert.pdf.
- [6] Earthquake Engineering Research Institute. (2011). The Mw 6.3 Christchurch, New Zealand, earthquake of february 22, 2011. Recuperado: https://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2011_pdf/EERI_NewZealand_EQRpt_web.pdf.
- [7] Rojas, F. et al. (2011). Performance of tall buildings in Concepción during the 27 February 2010 moment magnitude 8.8 offshore Maule, Chile earthquake. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(1), 37-64.
- [8] Westenenk, B. et al. (2013). Analysis and interpretation of the seismic response of RC buildings in Concepción during the february 27, 2010, Chile Earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(1), 69-91.
- [9] Wallace, J. (2012). Behavior, design, and modeling of structural walls and coupling beams - lessons from recent laboratory tests and earthquakes. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(1), 3-18.
- [10] Sritharan, S. et al. (2014). Understanding poor seismic performance of concrete walls and design implications. *Earthquake Spectra*, 30(1), 307-334.
- [11] Blandon, C. et al. (2018). Response of thin lightly-reinforced concrete walls under cyclic loading. *Engineering Structures*, 176(1), 175-187.
- [12] Arteta, C. et al. (2017). Global and local demand limits of thin reinforced concrete structural wall building systems. En 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile.
- [13] Arango, E., Viviescas, A. y Valencia, W. (2018). Modelado numérico de muros delgados de concreto reforzado en zonas de amenaza sísmica alta caso Bucaramanga. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander.
- [14] Paulay, T. y Priestley, M. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. John Wiley.
- [15] Rosso, A., Almeida, J. y Beyer K. (2016). Stability of thin reinforced concrete walls under cyclic loads: State-of-the-art and new experimental findings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(1), 455-484.
- [16] Chai, Y. y Elayer, D. (1999). Lateral stability of reinforced concrete columns under axial reversed cyclic tension and compression. *ACI Structural Journal*, 96(5), 780-790.

- [17] Parra, P. (2015). Stability of reinforced concrete wall boundaries. Disertación doctoral. University of California.
- [18] Dashti, F. (2017). Out-of-plane instability of rectangular reinforced concrete walls under in-plane loading. Disertación doctoral. University of Canterbury.
- [19] Clough, R., Benuska, K. y Wilson, E. (1965). Inelastic earthquake response of tall buildings. En 3rd World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand.
- [20] Galal, K. y El-Sokkary, H. (2008). Advancement in modeling of RC shear walls. En 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.
- [21] Kolozvari, K. et al. (2018). Comparative study of state-of-the-art macroscopic models for planar reinforced concrete walls. *ACI Structural Journal*, 115(6), 1637-1657.
- [22] Kolozvari, K. et al. (2019). State-of-the-art in nonlinear finite element modeling of isolated planar reinforced concrete walls. *Engineering Structures*, 194(1), 46-65.
- [23] Ngo, D. y Scordelis, A. (1967). Finite element analysis of reinforced concrete beams. *ACI Journal Proceedings*, 64(3), 152-163.
- [24] Nilson, A. (1972). Internal measurement of bond slip. *ACI Journal Proceedings*, 69(7), 439-441.
- [25] Franklin, H. (1970). Non-linear analysis of reinforced concrete frames and panels. Disertación doctoral. University of California.
- [26] Albornoz, S. (2016). Modelamiento de muros de hormigón armado con y sin aberturas, incorporando el efecto del pandeo en las barras. Tesis de maestría. Universidad de Chile.
- [27] Dashti, F., Dhakal, R. y Pampanin, S. (2014). Numerical simulation of shear wall failure mechanisms. En 2014 New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical Conference. Auckland, New Zealand.
- [28] Dashti, F., Dhakal, R. y Pampanin, S. (2015). Development of out-of-plane instability in rectangular RC structural walls. En 2015 New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical Conference. Auckland, New Zealand.
- [29] Dashti, F., Dhakal, R. y Pampanin, S. (2017). Numerical modeling of rectangular reinforced concrete structural walls. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 143(6), 04017031 1-14.
- [30] Niroomandi, A. et al. (2016). Finite element analysis of RC rectangular shear walls under bi-directional loading. En 2016 New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical Conference. Auckland, New Zealand.
- [31] DIANA FEA BV (2017). Finite element analysis user's manual: Release 10.2. TNO Diana, Netherlands.
- [32] Nasreddin, E. y Ergin C. (1991). Finite element analysis of prestressed and reinforced concrete structures. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 117(10), 2851-2864.
- [33] Sittipunt, C. y Wood, S. (1994). Finite element analysis of reinforced concrete shear walls. University of Illinois.
- [34] Parra, J. y González, W. (2018). Evaluación del comportamiento mecánico de muros de concreto reforzado ante diferentes velocidades de carga cíclica. Proyecto de grado. Universidad Industrial de Santander.
- [35] Thomsen, J. y Wallace, J. (1995). Displacement-based design of reinforced concrete structural walls: an experimental investigation of walls with rectangular and t-shaped cross-sections. Clarkson University.
- [36] Mander, J., Priestley, M. y Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
- [37] Hsu, T. y Belarbi, A. (1994). Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. *ACI Structural Journal*, 91(4), 465-474.
- [38] Menegotto, M. y Pinto, P. (1973). Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending. En IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Loads. Lisboa, Portugal.
- [39] Kolozvari, K., Orakcal, K. y Wallace, J. (2015). Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls. I: theory. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 141(5), 1-10.

Construcción ancestral y concepción mística de los Putucos del altiplano peruano

Yasmani Teófilo Vitulas Quille¹

Karina Betzabeth Reynoso Machaca²

¹Universidad Nacional del Altiplano

²Minedu

Perú

Con el afán de conocer y revalorar nuestra identidad cultural, se presenta este estudio de viviendas tradicionales conocidas como *Putucos*, para avivar el conocimiento ancestral, *aunque pocos conocemos su existencia*, se debe recalcar que no existen estudios al respecto y es necesario despertar el interés, para discernir y recuperar conocimientos ancestrales, identificando la existencia de un saber escondido (empírico), transmitido de generación en generación y que es parte de nuestra reserva cultural para el futuro. Los estudios presentados muestran referencias mundiales que posiblemente tendrían un ancestro común, desarrollando su identidad constructiva rural que —*cimientan un conocimiento tradicional*—, desarrollando en el proceso ritos y costumbres en la construcción de viviendas que resisten el agreste clima altiplánico *puneño*. Adicionalmente incidir en el entendimiento de conocimientos ancestrales, promoviendo el interés de propios y extraños en la aplicación de la denominada *Etnoingeniería*, que representa la existencia de saberes empíricos en construcción, que en la actualidad requieren de sustento en la ingeniería y nos asombran por su belleza y funcionalidad.

1. INTRODUCCIÓN

Al desarrollar el estudio, identificamos la existencia de un saber escondido, que a pesar del transcurrir del tiempo, ha sido transmitido de padres a hijos hasta llegar a nuestros días, siempre de la mano de maestros expertos que están encontrando resistencia en la juventud actual para que este saber siga siendo replicada en el futuro, a causa de las nuevas tendencias o aparente modernidad foránea, que —*por lo visto*— consumirán y producirán una inexorable desaparición de nuestra identidad cultural. Los estudios desarrollados y presentados en el presente trabajo, intentan mostrar con claridad a las construcciones tradicionales denominadas *Putucos*, estudiando un contexto mundial de otras expresiones arquitectónicas similares —*que podrían tener relación gracias a un ancestro común*—, además, se desarrolla la concepción mística existente en su proceso constructivo, detallando procedimientos que fueron aprendidos de sus antepasados y que no han sido olvidados, y más allá requieren ser recordados y compartidos.

Cuando iniciamos una discusión sobre el tema de los pueblos indígenas andinos, con ayuda de la divulgación científica se nos abre un sinfín de posibilidades para no dejar de lado aspectos socioculturales, históricos, que nos conllevan a revalorar aspectos de la propia cultura humana. Nuestra historia misma ha observado durante las etapas más antiguas —*de la denominada civilización altiplánica*—, pasando a las nuevas formas de asimilación de colonialismo y hasta nuestros días, enfrentamientos entre la visión del mundo y la cosmovisión andina. Aspectos que han generado —*lo que denominamos*— injusticia social que a su vez gesta la indiferencia y el olvido del conocimiento ancestral.

La divulgación científica no debe ser ajena a este proceso, puesto que mientras nos especializamos en el conocimiento científico; y al considerar a este la única forma de conocimiento válido; contribuye a la descalificación e inclusive la destrucción de muchos conocimientos no científicos —*denominados en la actualidad*— como los *Saberes Tradicionales Andinos*, contribuyendo a la marginación de los pueblos indígenas andinos, quienes solamente disponen de esta forma de saber, y muy pocos medios para transmitirlos y/o divulgarlos. *El vínculo entre la injusticia social e injusticia cognitiva será una de las ideas que más resistencia encontrará en la universidad toda vez que esta fue históricamente el gran agente del epistemicidio cometido contra los saberes locales, legos, indígenas, populares en nombre de la ciencia moderna* [1].

Una alternativa de solución para este aspecto es reorientar la *investigación comunitaria*, la *investigación acción*, y la *conexión y divulgación de saberes*, entre otros; para la realización de proyectos que sean de interés público. En consecuencia, encontramos que las denominadas ciencias sociales, e incluso las ciencias consideradas hasta ahora como exactas, en un afán de *Humanizar a la Ciencia*, hacen uso de nociones y métodos de la antropología, para reconsiderar su objeto de estudio, he aquí el nacimiento de tantas sub disciplinas como la *Etnobotánica*, la *Etnozoología*, la *Etnoeducación*, la *Etnomatemática*, la *Etnoarquitectura* y la poco conocida *Etnoingeniería*; y sin contar las más conocidas, que nacieron antes: la *Etnohistoria*, la *Etnolingüística*, la *Etnomedicina*, la *Etnopsiquiatría*. Bajo ese contexto, el objetivo primordial del presente capítulo es despertar el interés en el lector, para que pueda discernir el conocimiento denominado *Etnoingeniería* (ethnoengineering) como criterios empíricos vernaculares y ser estudiados a detalle en estudios subsiguientes.

2. MÉTODO

De acuerdo a las condiciones o principios que debe reunir cualquier propuesta que ayude al desarrollo del propósito investigativo y cumpliendo con las condiciones de exhaustivo y excluyente, el presente es un estudio sin intervención u observacional siendo del nivel investigativo exploratorio cualitativo, según la planificación de mediciones es un estudio retrospectivo con datos secundarios y según el número de mediciones es un estudio transversal, para la

población del estudio de caso, se tomaron las construcciones vernaculares del distrito de Taraco. El tamaño de muestra fue de 385 viviendas evaluadas, las cuales fueron tomadas en forma aleatoria y descritas para los fines de determinar la tipología de viviendas rurales. Una vez determinado la clasificación de las viviendas, se ha procedido a determinar las características constructivas y la mitología o mística en éste proceso, además de identificar los posibles antecedentes constructivos que pudieron dar origen a tan interesante propuesta constructiva.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Putuco como aspecto lingüístico

El cronista Felipe Huamán Poma de Ayala, en su obra *El Primer Nueva Crónica y buen Gobierno*, denomina *Pucullo* a pequeñas edificaciones funerarias del altiplano representándolo, como se muestra en la Figura 1. El término *Putuco*, es utilizado por Vicente Guerra Carreño en su obra *Kanchi*, la Provincia de los *Canchis* a Través de su Historia, empleándolo para designar construcciones abovedadas de carácter funerario construidas con piedra y barro.



Figura 1. Referencias gráficas de los Pucullos

Viajeros y estudiosos relataron en sus escritos y observaciones, presentando fotografías y grabados, *George Squier* (1864) generó el primer grabado impreso de un *Putuco* que denominó *Casa de césped* como se puede ver en la Figura 2; *Arnold Heim* (1947) en *Indigenous Building Techniques of Peru and Their Potential for Improvement to Better With Stand Earthquakes*, dedica un breve capítulo a la tecnología constructiva con *ch'ampa* y hace mención a los *Putucos*.



Figura 2. Casa de césped cerca de la desembocadura del río Rámis (Grabado de George Squier)

3.2 Antecedentes Históricos

Algunas evidencias arqueológicas de edificaciones semejantes, corresponden a la cultura *Wankarani* (1000-1500 a.C. hasta 100-200 d.C.), extendida al noreste del *lago Popó* (Bolivia), quienes desarrollaron construcciones sobre montículos de tierra (5-25m); y en la cultura *Tiahuanaco* (en Bolivia es llamado, 300-1200 d.C.), donde se pudieron identificar cimientos de piedra, además de pequeñas representaciones en cerámica como se puede ver en la Figura 3 (museo Tiwanaku) [2].

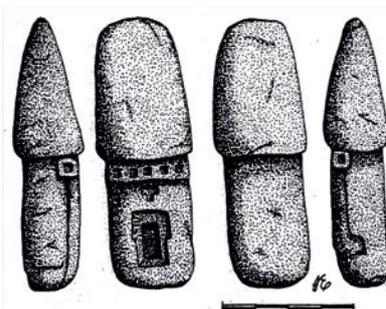


Figura 3. Cerámica de una casa de Tiahuanaco (Javier Escalante Moscoso)

Encontramos también edificaciones denominadas *Kullpis* (grupo étnico de Atavillo), que usan ingeniosamente piedras de las partes altas de la cordillera. Los *Cajatambos* y los *Yauyos* (Lima) también se distinguieron con sus construcciones tipo falsa bóveda. En el altiplano, evidencias analógicas están representadas por las *Chullpas* (torres funerarias) tal como se muestra en a Figura 4, teniendo mayor relevancia que las viviendas comunes. Al respecto el cronista Pedro Cieza de León manifiesta:

Y verdaderamente me admiraba de pensar como los vivos se daban poco por tener casas grandes y galanas, y con cuanto cuidado adornaban las sepulturas de estos indios, hechas como pequeñas torres de cuatro esquinas, unas de piedra sola y otras de piedra y tierra, algunas anchas y otras angostas [3].



Figura 4. Chullpa de Sillustani, Paucarcolla Puno, Perú. Estructuras funerarias Collas, ubicado en la meseta del Altiplano a una altura de 3840 m.s.n.m., llegan a tener 12 metros de altura y el diámetro que posee en la parte superior es mayor que el de la base, todo un reto a las leyes de la gravedad y al equilibrio. Pruebas con el carbono 14 indican que datan del siglo XIV al XVI d.C.

3.3 Referentes históricos

Las viviendas tipo *Putucos*, tiene una tipología constructiva y tradicional ancestral muy semejante a muchas culturas que tuvieron hegemonía alrededor del lago *Titicaca*. Las culturas que se asentaron en dicha cuenca, además del lago *Popo*, tuvieron formas constructivas similares, utilizando desde bloques de adobe, hasta trabajos más elaborados de piedra, usados como sepulcro de sus miembros más resaltantes, tal como mencionan las crónicas de *Pedro Cieza de León* y las crónicas de *Huamán Poma de Ayala*. Existen muchas construcciones que podemos tomar como referencia (Figura 5), algunas de las más importantes son:

- *Los Gintiles*: Son construcciones funerarias (riveras del lago Titicaca, a 3827m.s.n.m.), en zonas elevadas y asegurándose de que los rayos matutinos del sol lleguen primero a las puertas cuadradas (dirigidas al este), pequeñas para que una persona pueda ingresar con facilidad. [4]
- *Chullpas de Jachaphasa*: Son fortalezas (a unos 2 km al noreste de Rosario) amuralladas orientadas en dirección Oeste-Este, con varios edificios (100 chullpas de piedra, mayormente redondos), concentrados en 10 ó 12 grupos.
- *Viviendas de la Cultura Umasuyo*: Al norte del altiplano, se encuentra una tipología interesante de viviendas unifamiliares construidas con bloques de ch'ampa y muy raras veces de adobe, la forma esencial es piramidal, es usado también para enterrar a sus muertos.
- *Pukullus Chipayas*: Denominados también como Trulys, Phutukus, Qullqa o Chulpas (ubicados cerca de los 4000m.s.n.m., en el altiplano boliviano [5]), viviendas de las comunidades Urus Chipayas, de planta circular y techo abovedado usado por uno de los pueblos más antiguos de Bolivia. Las paredes se construyen con tepes (pedazos de tierra cubiertos de hierba) y barro, algunos techos son cubiertos con ramas de arbustos entrelazados, sujetos con tiras (a modo de cuerdas) de cuero.



Figura 5. Tipología constructiva regional semejante

3.4 Referentes mundiales

Además de las referencias locales, se tienen referencias mundiales interesantes, que —a nuestro parecer— es necesario estudiar, para poder ver con mayor amplitud la utilización de procesos constructivos semejantes alrededor

del planeta, que muy bien pudieran ser considerados como antepasados arquitectónicos o causas de una evolución paralela en correlación a técnicas ancestrales comunes, tal como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Tipología constructiva mundial

Tenemos a El *Tholos Griego*, que era una adaptación del tipo de templo circular (espacio circular cerrado de unos 20m de diámetro), cubierto con un tejado cónico. Los *Cases Obos* de Camerún, los *musgum*, un grupo étnico en la provincia del extremo Norte, crearon sus hogares de lodo comprimido y secado al sol, las viviendas tienen forma cónica y son de gran altura, tienen forma de una concha, cuenta con patrones geométricos en relieve. Los *Trullis* de Apulia y *Alberobello* en Italia, se remontan, según algunas teorías, hasta cinco mil años de antigüedad, pues de acuerdo a algunos investigadores se relacionan con los vestigios arqueológicos de domos de sección catenaria en piedra en las Islas Baleares, en Cerdeña y en *Pantelleria*, son célebres en el mundo por su belleza característica y su unicidad, representan uno de los ejemplos más extraordinarios de arquitectura popular.

Las Cúpulas de *Aleppo* en Siria, construidas por los pueblos cercanos a *Aleppo*, cuentan con un modelo arquitectónico interesante de forma plana en su fachada y con cobertura que terminan en un semidomo, generalmente alineados unos con otros. Las Cúpulas de *Siestan* en Afganistán, cuentan con la forma típica estudiada hasta el momento, con la variación de que en su cobertura suelen existir pequeñas chimeneas o ductos para ventilación, las viviendas se encuentran unidas unas a otras. Los *Talayot* de las Islas Baleares, que tienen una clara forma troncocónica y mantiene una pendiente constante, construido en una base circular y con la utilización de piedras acomodadas una sobre otra encajadas de tal forma que se genera un muro monolítico. Los *Nuraghi* de Cerdeña, tienen una forma cilíndrica con base circular y pendiente constante, se puede apreciar una cúpula al final del elemento, la cual tiene forma de un semidomo. Finalmente, entre otros muchos, tenemos a Los Templos de la India, que son formas más sofisticadas y complejas con domos de sección catenaria.

3.5 Habitación y arquitectura

El impacto de la construcción de tierra con la era moderna y la industrialización condujo a los países más industrializados al abandono de estas técnicas de construcción, sustituyéndolas por el ladrillo, hormigón, acero y vidrio. En países menos desarrollados, la tierra continúa siendo el principal material utilizado, por ser un recurso de bajo costo, fácil manejo y suficientemente sencillo como para posibilitar el autoconstrucción. La tierra cruda es uno de los principales materiales de construcción utilizados a lo largo de la historia para solucionar necesidades habitacionales. Aproximadamente un tercio de las viviendas en pie, que hay en nuestro planeta, tal como se puede apreciar en la Figura 7, son construidas con tierra [6]

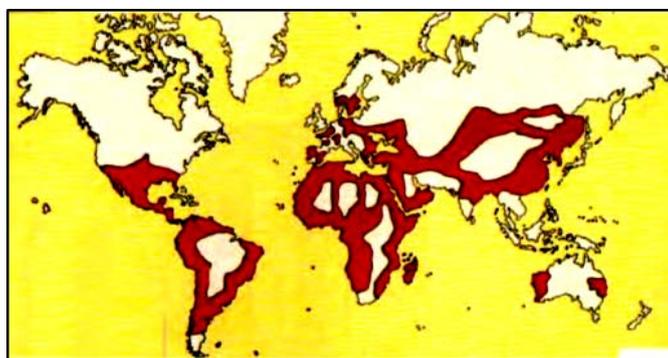


Figura 7. Mapa de Distribución Mundial de Construcciones ejecutadas en Tierra. (Neves & Borges Faria, 2011)

El potencial de la tierra cruda como material de construcción ha perdido credibilidad y sus propiedades —y *amplias posibilidades*— se han ido olvidando y desacreditando especialmente en países en vías de desarrollo y áreas rurales, siendo considerado como un *material de los pobres*, poco resistente ante amenazas naturales y foco de enfermedades. Desde su asentamiento en los andes latinoamericanos, se humanizó los entornos naturales y este proceso de adaptación al agreste clima alto andino dio como resultado que amplias llanuras y manantiales fueran transformadas

en paisajes de asentamientos humanos que —*para el caso del presente estudio*— con mayor frecuencia están en las orillas de los ríos afluentes y riberas del lago *Titicaca*. Este hábitat sinuoso y disperso de las áreas rurales cuya densidad de población es en su mayoría *aymara*, ha recreado una tipología tradicional constructiva de viviendas y sistemas de organización del espacio, con características exclusivas del altiplano puneño, atendiendo a las necesidades del agreste clima frígido, seco y extremo.

El sistema constructivo realizado con adobes y/o *ch'ampas*, según la arquitecta María Guillén Valenzuela (...) *es un sistema sencillo, fácil y rápido de construir. Se utilizan pocas herramientas y la técnica que se aplica ha sido transmitida de generación en generación. No se necesitan pruebas de laboratorio para analizar la calidad del material, se aplican pruebas prácticas (...)*, y este sistema permite edificar bellos y originales *Putucos*, y son amigables con el medio ambiente.

Se debe entender que la arquitectura tradicional es una de las máspreciadas expresiones culturales en la historia de una comunidad, es un referente espacial que queda gravado en la memoria de propios y extraños que tienen —*como experiencia propia*— el privilegio de visitar y poder apreciar —*con sus propios ojos*— tan majestuosas y creativas construcciones denominadas *Putucos*. Dichas construcciones encierran códigos especiales de la identidad cultural, escondiendo un conocimiento ancestral que debería estudiarse, revalorarse y preservarse para futuras generaciones.

Muchas manifestaciones arquitectónicas tienen formas relacionadas con las semiesferas, elipsoides y secciones troncocónicas, por tanto es necesario conocer la forma y la función de la tipología constructiva utilizada y —*con más estudios*— podremos replicar dichos conocimientos e identificar sus características y técnicas constructivas, de esta forma poder vislumbrar la cultura, técnica y compatibilidad entre los materiales disponibles, trasfiriendo a la sociedad un desarrollo sostenible en el ámbito social y local.

3.5.1 Arquitectura vernácula

De un tiempo a esta parte, la Arquitectura Vernácula está siendo revalorada por autores nacionales y extranjeros, poniendo en consideración a los materiales del entorno en función de los recursos disponibles, generando la optimización y reutilización de materia prima que es respetado y revalorado por los pobladores, desarrollando rituales preestablecidos de acuerdo a la zona en la que se encuentran.

3.5.2 Conceptualización del *Putuco*

Los *Putucos* consideran un enfoque del pensamiento andino más que el pensamiento occidental, por tanto, para entenderlo podemos darle un concepto singular y representarlo como una célula de barro, cuya definición singular dará lugar a un mini organismo viviente que influye en su crecimiento, entendimiento y transformación, teniendo un modelo conceptual e integral de la arquitectura, contexto urbanístico y territorial [7], tal como se aprecia en Figura 8.



Figura 8. Vivienda tipo *Putuco* en *Taraco – Puno – Perú*, se puede apreciar en una escala de referencia, las dimensiones de la vivienda

3.5.3 Tipología, forma y volumetría

Un *Putuco* asume una forma rectangular ligeramente curvada, dicha morfología depende del tipo de material empleado para su construcción, la función que va a cumplir más adelante y la forma del techo. Los muros evocan una forma tronco-piramidal tal como pudimos ver en la Figura 8, comienza desde la base hasta la altura donde se inicia el techo, tiene una inclinación —*hacia el interior*— entre 75° a 80°, este ángulo de inclinación juega un papel muy importante en el comportamiento de la estructura frente a los agentes atmosféricos, tales como la acción erosionable del agua (el agua fluye más rápido o con mayor velocidad que en pendientes suavizadas).

La forma y volumétrica del techo tiene generalmente una forma cónica la cual es perceptible en viviendas de planta simétrica, la forma geométrica cónica empieza desde la altura en la cual terminan los muros portantes y culmina en una cúpula o techo abovedado, el ángulo de inclinación varía entre 50° a 60°, que es un factor importante para la

durabilidad en periodos de precipitaciones pluviales intensas y duraderas, mostrando dichas consideraciones dimensionales en la Figura 9.

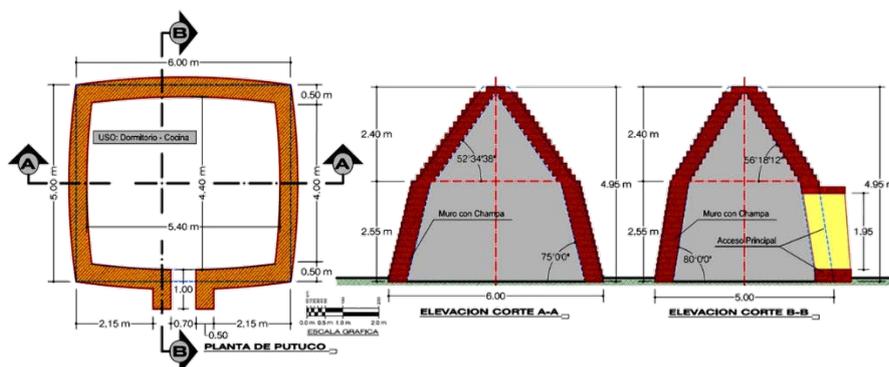


Figura 9. Detalle arquitectónico típico y dimensiones ideales interiores

3.5.4 Forma del conjunto arquitectónico

La distribución de los ambientes en una vivienda típica no tiene muchas variaciones [8], más bien responde a las necesidades de cada grupo familiar, además está distribuido de tal forma que se puedan desarrollar los rituales acostumbrados para cada etapa de la vida comunal y personal como se aprecia en la Figura 10 y 11.

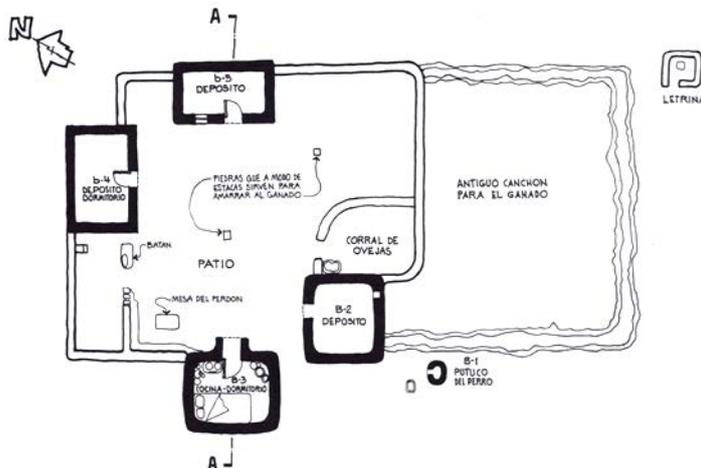


Figura 10. Planta típica de una vivienda de Taraco (Levantamiento desarrollado a la vivienda del señor Paulo Chambi, por el Arq. Ferruccio Marussi Castellan, 1999)

En la vivienda elegida para análisis, el ambiente más grande es el destinado para cocina y/o dormitorio, a la vez y se generan ambientes independientes para almacén y/o depósito, con características modernas (cobertura con paja o calamina), además de tener los corrales para ganado, se generan también cercos de protección para la vivienda en su conjunto.

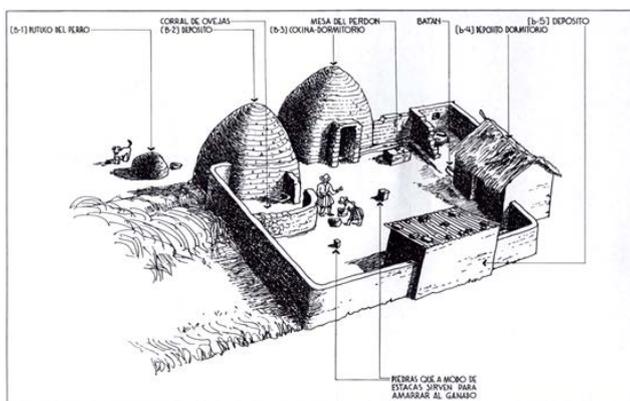


Figura 11. Vista isométrica del conjunto (Levantamiento desarrollado a la vivienda del señor Paulo Chambi, por el Arq. Ferruccio Marussi Castellan, 1999)

Algo que se puede resaltar es la ubicación de la mesa de perdón o mesa del sacrificio (Figura 10 y 11), en la cual se desarrollan los rituales acostumbrados durante todo el año, podemos ver que la ubicación es muy cercana al

dormitorio, para de esta forma facilitar el armado de la ofrenda ritual. La característica forma de construcción la hacen única tal como podemos apreciar en la Figura 12.



Figura 12. Elevación frontal de un *Putuco* (Levantamiento desarrollado a la vivienda del señor Paulo Chambi, por el Arq. Ferruccio Marussi Castellan, 1999)

3.5.5 Ubicación geográfica

Esta tradición constructiva se presenta en un área geográfica compartida entre los distritos de *Taraco*, *Samán* y *Arapa*, que circundan la laguna de *Arapa* y el *Lago Titicaca*, especialmente en la vía *Taraco-Huanané*, entre las coordenadas 15°10'00" @ 15°24'00" Sur y 69° 47' 00" @ 70° 00' 00" Oeste.

3.5.6 Material de construcción

En la construcción intervienen materiales que son organizados y que es construida con conocimientos empíricos transmitidos de generación en generación y reflejan un amplio conocimiento ingenieril —*que debería ser rescatado, y porque no utilizado en procesos constructivos de zonas semejantes*—. El material de construcción más frecuentemente utilizado es la denominada *Ch'ampa*, ó *T'epe*, el cual tiene un proceso de extracción que no representa un costo elevado, accesible para la población, además de tener mayor estabilidad y resistencia a condiciones extremas, otro material utilizado con frecuencia es el *Adobe*, que representa un mayor costo.

3.6 Ritos en la construcción

En tiempos antiguos, los mitos mágicos fueron necesarios en muchos aspectos de la vida cotidiana, y en este aspecto asociado al proceso constructivo de viviendas. Esta información se desprende claramente en los escritos de Arriaga: *En la actualidad tanto los quechuas como los aimaras celebran ceremonias dedicatorias, en la celebración de las diferentes etapas generalmente cuando se excavan los cimientos de las casas y también muchas veces cuando se va a techar la estructura.* [9]

En la mayoría de las zonas altiplánicas, los rituales van de la mano de un *Yatiri*¹ para que haga una veneración a la *Pachamama*² y los *Apus*³ en las diferentes etapas del proceso constructivo de una vivienda. Es por esto que *los mitos han sido y son parte sustancial de la cultura andina, entendida ésta, como la cultura que se forja y se desarrolla en el Perú antes de la invasión española y también como la cultura que resiste y recrea en nuevos contextos históricos. El mito fue y es no sólo una forma de afrontar la vida, como una concepción esencial para articular sus relaciones sociales, políticas, económicas.* [10]

Antes de elegir el terreno, los dueños son los encargados de extender sobre una manta o frazada la *istalla* de coca, luego toma el mando el *Pak'u*, quien, utilizando un lenguaje específico para este acto, alza las hojas de coca, invoca a las divinidades de la zona, mientras suelta las hojas para adivinar las respuestas esperadas, va diciendo (en idioma nativo aimara):

Jach'a achachila, wawamana machaqa uta utachasiñataki, uraqiya uñacht'ayma. Uka uraqixa sumauja samaya; umansa, thayansa, jani apañpachawxa

Oh grandes dioses sobrenaturales antiguos, para que este tú hijo construya su casa, muéstranos un lugar propicio. Esta casa que esté bien ubicada; en inundaciones, en vientos, no se los arrebatos

¹ Persona entendida en prever el futuro de otra mediante la lectura de la caída de las hojas de coca. El cual es solicitado por los interesados.

² Divinidad femenina protectora y guardiana por excelencia. El significado de *Pachamama* es *Madre Tierra*. *Pacha* para los pueblos aimara equivale a tierra, universo, mundo o cosmos, tiempo y espacio. Usualmente se emplea como significado de: *tierra*. Por otra parte, *Mama* significa madre que origina, que concibe la vida.

³ Deidad andina representada por las cumbres más altas e imponentes, a los que se les considera como entes protectores del equilibrio y la vida.

Una vez construido el *Putuco*, procedimiento que suele terminar en una jornada laboral (un día de trabajo), y cuando los rayos del sol forman una hermosa estela a lo lejos, despidiéndose de los hombres (entre las 4:00 y 6:00p.m.), el dueño de la nueva vivienda, acompañado de sus familiares, con la presencia del padre (el abuelo de la familia), además de los trabajadores, —*en su conjunto*— se felicitan por la labor realizada, con abrazos y pidiendo perdón unos a otros, por los posibles excesos producidos, perdón a la tierra, con alegría y optimismo, pronunciando los siguiente:

*Kuna llakitsa, perdont'apkita
Taqini perdont'apkita, Dios awkisjama*

*De todo mal y de cualquier pena, perdónanos
de toda nuestras malas acciones perdónanos, tú que eres nuestro padre Dios*

También realizan el mito del *k'intu*, para esto el dueño y todos los participantes se reúnen en el interior del nuevo *Putuco*, con abrazos y dando gracias al maestro constructor y sus ayudantes, además de los participantes que participaron en la construcción, pidiendo que el momento sea bendecido y se recuerde como punto de partida del uso de la nueva vivienda, diciendo:

*Suma urakipanaya, machaqa utaxa,
taq'paxa tukuchataxiwa*

*Que sea una buena hora, para nuestra nueva casa,
que fue completamente concluida*

Posteriormente se procede a desarrollar el baile del *achuqallu* (entre las 8:00 y 10:00p.m.), para esto los ayudantes seleccionados entran en escena jocosamente disfrazados con pieles de animales simulando a feroces cóndores, los cuales a su paso por rebaños de ovejas y llamas suelen raptar con sus terribles garras a las crías más pequeñas y descuidadas (esta representación es un mito), dirigidos por el *chuqallu* mayor; la comida para esta representación es preparada cuidadosamente con los intestinos del cordero que fue sacrificado especialmente para este acto. El baile del *achuqallu* tiene innumerables copias y diversos versos que son cantados por los participantes de la pequeña fiesta improvisada, y se puede apreciar que los cánticos tienen una relación con la construcción de la nueva vivienda y la representación de la danza:

*Achuqallu tatawa mantani, machaqa utawa utjasipana, machaqa tapawa utjasipana.
Janiwa mulljasipxätati, achuqallu tatawa jayamarkata purini*

*Está entrando el señor achuqallu, sabiendo que hay una casa nueva, sabiendo que hay un nido nuevo.
No tengan miedo, el señor achuqallu de muy lejos ha llegado*

Esta copla tiene un contenido semántico relacionado con la vivienda. Pues el aimara y/o quechua son lenguas que en su expresión guarda todo el valor cultural de un pueblo, organizado en ocasiones circunscritas de una ceremonia [11]. Otra copla utilizada es:

*Achuqallu tatawa purini, tata sitani mama sitani.
Qawkina machaqa istallaxa utji, qaukin ach'uwaña utji, winuxataki*

*Ha llegado el señor achuqallu, señor dueño y señora dueña de la casa.
Donde está la istalla nueva, donde está el vino, para rociar*

Representando muy fugazmente la necesidad de la presencia del cóndor, que bendice y celebra la construcción, además requiere del vino para poder rociar en las paredes y de esta forma dar el alimento vital y dulce a la tierra, para su aceptación y retribución futura para el bienestar de la nueva familia. Terminado este acto, además el de compartir alimentos, se procede a dar gracias; pasando a la conversa que es acompañada por alcohol y la *Chaqcha*¹ de hojas enteras de coca, lo cual puede prolongarse hasta altas horas de la noche.

4. CONCLUSIONES

Tal como se pudo estudiar, la representación del conocimiento ancestral en la construcción de viviendas y la mística existente en su proceso, traen a luz, un arraigo y vinculación estrecha entre la naturaleza —*representado por la madre tierra*— y el hombre como un ser que vive y subsiste en el altiplano puneño, vínculo que genera un compromiso de nacimiento, de cuidar su entorno, que no puede ser roto, y que integra la costumbre y el conocimiento, generando una importancia trascendental de la vivienda rural denominada *Putuco*.

¹ Procedimiento por el cual se mastican hojas de coca, para luego desecharlas y volver a repetir el procedimiento.

Enfatizando a importancia de la vivienda rural, podemos mencionar que *La casa es concebida como prolongación de la tierra (Pachamama), a la que el andino debe agradecer permanentemente en sus ofrendas, porque de sus frutos vive. Estas ofrendas o rituales no constituyen formas epidérmicas de superstición, sino que expresan el sentimiento profundo de la búsqueda de una alianza con los espíritus del bien y Dios* [12].

En las construcciones adoptadas empíricamente, demuestran un conocimiento intuitivo escondido en la construcción de *Putucos*. Es necesario entonces rescatar estos procedimientos, que es sí mismos son óptimos y han sido utilizados por los pobladores del *Altiplano Puneño*, además se ha visto que estas soluciones estructurales fueron similares en diferentes construcciones a nivel del planeta tierra. A este entender, será necesario desarrollar modelos matemáticos y un adecuado estudio de los materiales de construcción, para hacer aproximaciones relativamente exactas del comportamiento de los sistemas estructurales, y de esta forma contribuir en la línea de investigación y ampliación del conocimiento.

REFERENCIAS

- [1] Ávila, R. (2010). De la función de ex-tensión a la función de in-tensión o de cómo subsanar el epistemicidio provocado por la universidad moderna. Editorial Universidad del Rosario.
- [2] Escalante, J. (1993). Arquitectura Prehispánica en los Andes Bolivianos. CIMA.
- [3] Cieza, P. (1975). Crónica de Perú. Biblioteca Peruana – Ediciones PEISA.
- [4] Vitulas, Y. y Reynoso, K. (2013). Etnoingeniería de los Putucos. Universidad Nacional del Altiplano. Editorial Altiplano.
- [5] Zerda, J. (1993). Los Chipayas: Modeladores del Espacio. UMSA.
- [6] Gaviorno, S. (2016). Curso taller de bioconstrucción, formas y patrones naturales. Recuperado: <http://es.slideshare.net/SebastianGaviorno/apunte-n1-curso-bioconstrucc>.
- [7] Vitulas, Y. y Reynoso, K. (2013). Etnoingeniería de los Putucos. Universidad Nacional del Altiplano. Editorial Altiplano.
- [8] Marussi, F. (1999). Arquitectura Vernacular: Los Putucos de Puno. Centro de Investigación de la Universidad Ricardo Palma.
- [9] Tschopick, H. (1968). La Magia en Chucuito. Edición del Instituto Indígena Interamericano.
- [10] Valcarcel, R. (1988). Mitos, dominación y resistencia andina. UNMSM.
- [11] Mendoza, G. (1991). Tecnología de construcción de viviendas en la comunidad de Titihue Huancane. Trabajo de grado. Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- [12] Gutiérrez, R. (1986). Arquitectura del Altiplano Peruano. Libros de Hispanoamérica.

Análisis a la auto-urbanización generada por el Parque Explora como patrón de auto-organización urbana en la ciudad de Medellín, Colombia

Javier Enrique Rivero Jerez
Carlos Alberto Palacio Tobón
Universidad de Antioquia
Colombia

Las teorías modernas de análisis urbano, han servido como herramienta para el estudio del orden que emerge en una sociedad como un sistema articulado más organizado. A partir de este nuevo concepto de urbanismo social, se han definido las pautas para el estudio de las condiciones iniciales que regulan un sistema urbano y que funciona como mecanismo de auto organización. Es así como luego de hacer un análisis general desde la teoría de la complejidad y del caos de los proyectos de planificación urbana en la ciudad de Medellín, se ha estudiado el caso particular de El Parque Explora, evaluando su impacto en el sector nororiental de la ciudad, desde lo experiencial, antes y después de su aparición, y, de acuerdo con sus características, el grado de complejidad que aporta al sistema completo.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se han hecho diversos estudios que se pueden aplicar al análisis de los impactos de las actuaciones urbanas desde la concepción de la auto-organización y los sistemas emergentes; característicos de la teoría de la complejidad y el caos. Entre estos estudios encontramos la propuesta The Urban CoBuilder [1] como herramienta de simulación de sistemas emergentes en el urbanismo desde la planificación social, junto al estudio de la Teoría de auto organización en sistemas urbanos complejos [2]. También cabe destacar el estudio de Abbas [3] sobre el futuro de las ciudades inteligentes desde la auto-organización de los sistemas, entendiendo la complejidad del sistema desde la relación entre sus partes, que se complementa con la visión sistemática de Fritjof [4]. Este nuevo concepto del sistema adaptativo aplicado al urbanismo se pone en evidencia en esta investigación que ayuda a identificar posibles patrones de orden en las ciudades (concepto que está en concordancia con los estudios del Instituto de Sistemas Dinámicos [5]), dentro de los procesos de auto-organización desde la pequeña escala en el urbanismo. Hasanov [6] muestra en su publicación de la transformación a partir de la auto organización [6] donde la base del patrón se da desde la inteligencia colectiva y su complejidad desde la interacción de los agentes locales que trabaja también Heylighen [7] entendiendo esta interacción en una determinada sociedad, con un llamado a la coherencia urbana y el sentido de ciudad vida.

Con el anterior contexto, surgió la necesidad de estudiar las estrategias de transformación y planificación pensadas para la ciudad de Medellín, que por sus características geográficas, han llevado a una expansibilidad urbana fuera de control, expansión que en su gran mayoría se realiza desde la informalidad, evadiendo los planes de desarrollo urbano y provocando un crecimiento desmedido, que es propio de ciudades caóticas en las que los órdenes emergentes superan cualquier estrategia de planificación. Esta situación, hace necesario un análisis que los estudios del urbanismo en Medellín se realicen desde el punto de vista de la teoría de la complejidad y el caos, como un nuevo instrumento de análisis, para dar paso a una ciudad con mejor proyección urbana.

El objetivo de esta investigación es afrontar el tema del desarrollo urbano en Medellín, analizando un caso particular: El Parque Explora, como un ejemplo de patrón de auto-organización, el cual ha evolucionado como un sistema adaptativo, permitiendo así una mejor comprensión de los fundamentos del nuevo urbanismo con carácter social, desde la participación, evidenciando un conocimiento universal reflejado en la teoría de la complejidad y el caos. Este nuevo urbanismo, que ha representado un largo proceso de transformación en las últimas décadas, ha generado impactos tanto a nivel social como ciudadano desde la pequeña escala.

Por otro lado, para comprender el funcionamiento de los sistemas urbanos se han tomado en cuenta dos conceptos asociados a las teorías del caos y la complejidad. En primer lugar, el caos entendido como una perspectiva que permite concebir el orden a partir del posicionamiento aleatorio de los elementos que se consideran fuera de lugar y que se auto-organizan mediante procesos emergentes en los sistemas de la naturaleza, cuyas características particulares son el azar y el cambio, los cuales actúan a favor de las dinámicas de la evolución aportando estabilidad al sistema [1]. La *complejidad*, por otra parte, cuestiona el pensamiento clásico de separabilidad en el cual se descomponen los elementos con el fin de ser entendidos de forma individual [4], destacando las interacciones entre los elementos como objetos de estudio y definiendo el pensamiento complejo desde la inseparabilidad con el fin de establecer una relación dialógica entre ambos conceptos (separabilidad-inseparabilidad), como se evidencia en el trabajo de Rivero [8].

A partir de las nociones de caos y complejidad se tiene que entre el orden y el desorden se produce el principio de la organización en un sistema adecuado (entendiendo por sistema a la relación entre las partes que forman un todo), proceso en el que los imprevistos se convierten en las condiciones iniciales, a partir de las cuales se dan los cambios, y que definen, según Abbas [3], un principio de evolución de las ciudades desde su inteligencia. En la Figura 1 se puede observar el orden en que se lleva a cabo el ciclo de auto organización en el sistema.



Figura 1. Auto organización en sistemas

Al igual que en los sistemas naturales, la complejidad está presente en las ciudades, y reside en la calidad del sistema dinámico que las configura, donde los intercambios de flujos generan atracciones por complementariedad. La ciudad es percibida como un nodo que se articula para generar actividad en una red de mayor escala; es decir, hace parte de una red anclada a un sistema de organización que configura sistemas escalonados de mayor magnitud.

En el caso de las ciudades, la teoría de la complejidad define los principios fundamentales que sirven de soporte al diseño urbano y, se complementa, con el concepto de naturalidad, aportando armonía al sistema y complejizando y consolidando su estructura a partir de una adecuada distribución de usos y jerarquización de escalas.

El concepto de red (asociado con la teoría de la complejidad), aporta una aproximación al problema de la complejidad organizada de una ciudad. La comprensión de las características físicas de la red hace posible, incluso, predecir su comportamiento antes de que el sistema se vuelva caótico. Una red que permita un mayor número de conexiones óptimas en todas sus escalas permite priorizar la escala del peatón, poniéndola por encima de la escala de vehículo y facilitando una mayor organización en las conexiones de los niveles más pequeños, lo que genera relaciones eficientes en un orden fractal, que sólo es posible si existe un alto grado de complejidad en la ciudad.

Los primeros en comprender la ciudad como sistema complejo fueron Jacobs [9], Meier [10] y Alexander [11]. Ellos se encargaron de analizar la ciudad como un organismo biológico con cualidades para auto-regenerarse y adaptarse a las necesidades inmediatas de la población. Este modelo complejo fue definido por Meier [10] como una evolución del dinamismo urbano donde el intercambio de información debe apoyarse en sus redes para configurar una estructura de carácter lógico, a partir de las relaciones en el sistema, con el objetivo de minimizar los costos.

Los sistemas complejos sugieren para las ciudades, una arquitectura de la información que debe funcionar a diferentes escalas y bajo condiciones variables a partir de las cuales la teoría de la complejidad define unos principios fundamentales para el diseño urbano. De acuerdo con Salingaros [12], la red urbana está constituida a partir de tres principios generales: a) los *nodos*, que son elementos asociados a la actividad humana (residencias, restaurantes y demás lugares de encuentro e interacción), los cuales crean una red a partir de las trayectorias que los conectan; b) las *conexiones*, que surgen de las relaciones entre múltiples nodos; y c) la *jerarquía*, que es el proceso de organización escalonada de las conexiones que evita el colapso de la red y va desde la pequeña escala (sendas peatonales) hacia escalas mayores (calles de capacidad crecientes).

Las conexiones son tratadas como un problema matemático a partir del cual se define la actividad de los nodos, interacción que constituye un proceso perceptivo en el afán por comprender la naturaleza de la ciudad, en la que se articulan eficientemente los elementos. Esta relación, debe ser observada a través de la actividad humana [1], porque mientras más fuertes las conexiones entre nodos, mejor estructurada estará la red, lo que hará menos caótico al sistema urbano y aportará mayor vitalidad a la ciudad.

La complejidad adquiere el carácter de red en la medida en que la comunicación entre sus partes hace que evolucione como un todo y le confieren la condición de sistema. La red debe estar definida por los vínculos existentes entre sus partes y tomando, como punto de partida, la escala del peatón, desde donde el intercambio, con el colectivo, ayuda a determinar las probabilidades de complejidad a partir de las cuales se empiezan a configurar procesos dinámicos asociados a procesos modernos de urbanización [6]. En este punto empiezan a consolidarse los vínculos (escalonadamente -de menor a mayor-), y a producirse la auto-organización del sistema, por medio de las interconexiones, logrando así configurar la vitalidad propia de los sistemas complejos.

2. MÉTODO

La metodología propuesta para el desarrollo de esta investigación consta de cuatro etapas:

- Elaboración del marco teórico: se implementaron las definiciones, hipótesis y conceptos, con los cuales se fundamenta la investigación
- Fase investigativa o documental: se llevó a cabo la revisión y recolección de fuentes bibliográficas que respaldan la hipótesis.
- Fase de campo: se visitó el Parque Explora (como caso de estudio), con las herramientas para la recolección de datos con el fin de recoger la información que sirve como evidencia para el análisis
- Fase de resultados: se hizo el análisis pertinente que relaciona la teoría con los datos y se obtuvieron los resultados finales de la investigación.

Para la toma de la muestra se construyó un formato de entrevista que permitiera el respectivo análisis de los datos desde las teorías formuladas anteriormente. Para la construcción de esta herramienta se contempló una muestra de 45 personas entre los 20 y 50 años y unas distancias entre los 100 y 300 metros con respecto al *atractor* (Parque Explora). El rango de edades fue considerado relevante ya que son edades que corresponden a personas que han habitado el sector en el marco temporal de la implantación del atractor; siendo testigos activos de la transformación del sector. La distribución de la población y las distancias se estableció de la siguiente manera:

Para un radio de 100 metros:

Entre los 20-30 años una muestra de 5 personas

Entre los 30-40 años una muestra de 5 personas

Entre los 40-50 años una muestra de 5 personas

Para un radio de 200 metros:

Entre los 20-30 años una muestra de 5 personas

Entre los 30-40 años una muestra de 5 personas

Entre los 40-50 años una muestra de 5 personas

Para un radio de 300 metros:

Entre los 20-30 años una muestra de 5 personas

Entre los 30-40 años una muestra de 5 personas

Entre los 40-50 años una muestra de 5 personas

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se analiza la información recolectada en las encuestas, considerando como hipótesis preliminar al Parque Explora (Figura 2 y Tabla 1) como *atractor* urbano de Medellín, con base en el estudio de Rivero [13], y teniendo como punto de partida el concepto de la auto-organización de los sistemas emergentes [3] y la capacidad de recuperación de una ciudad [1].



Figura 2. Parque Explora Gilberto Echeverri M.

Tabla 1. Información técnica del Parque Explora

Arquitecto:	Alejandro Echeverri.
Equipo de diseño:	Isabel Dapena, Camilo Restrepo Villa, Sergio Restrepo, Guillermo Valencia, Juan Carlos Castañeda, María Andrea Díaz, Diana Herrera, Edgar Mazo.
Cliente:	Alcaldía de Medellín, Secretaria de Obras Públicas.
Área construida (público y privado):	17.889 mt ² .
Áreas abiertas (público y privado):	9.586 mt ² .
Áreas abiertas (incluyendo calles, áreas de acceso y dársenas de entrada):	12.980 mt ² .
Fecha de proyecto:	2005.
Fecha de finalización:	2008.
Estructura de concreto:	León Restrepo.
Estructura metálica:	Estaco.
Museólogo:	Andrés Roldán.
Diseño de Paisaje:	Jardín Botánico de Medellín.

El Parque Explora es un museo de ciencia, tecnología e innovación ubicado en la zona nororiental de la ciudad de Medellín. Su estética busca ensamblar el bosque con un medio urbano, sacando provecho de sus límites con otros parques, lo que genera un panorama visualmente agradable que combina armónicamente el movimiento y el color a partir de estructuras que alternan formas con jardines y colores, incentivando la curiosidad por la ciencia de las cosas. Su función como *atractor* está dada a partir de que se trata de un punto llamativo de la ciudad en el que convergen habitantes de distintos lugares (Jacobs [9]). Para el análisis de las muestras obtenidas de las encuestas, se contempló en el temario de las mismas, factores relacionados con las teorías de complejidad mencionadas anteriormente, como soporte de la investigación, y aportando un nuevo concepto de análisis urbano.

3.1 Factores de complejidad

La diversidad está dada por las funciones que se originan en las necesidades del colectivo –condiciones iniciales– y de las cuales surgen actividades complementarias. Este factor estudia las necesidades en conjunto con el fin de determinar sus causas, analizarlas y buscar la forma de satisfacerlas y complementarlas con otras actividades. La población, entendida como sistema, depende tanto de la diversidad como de cada uno de sus componentes y sus usos, lo que favorece la retroalimentación desde los vínculos y permite trayectorias más eficientes que restablecen el orden como respuesta a la participación ciudadana, trayendo como resultado soluciones más apropiadas y acordes a las necesidades de los ciudadanos.

La diversidad, en torno al Parque Explora está determinada por unas características propias del sector y su población. En el caso de la diversidad de alimentos se hace referencia a las distancias que las personas recorren para conseguir comida. En la Figura 3 se observa el cambio en los recorridos que deben hacer los habitantes del sector para obtener los alimentos básicos para el hogar. En una distancia entre los 100 y los 200 metros, la mayoría de las personas, en un rango de edades de 20 a 50 años, no se desplazaban más de los 100 metros para la obtención de sus alimentos.

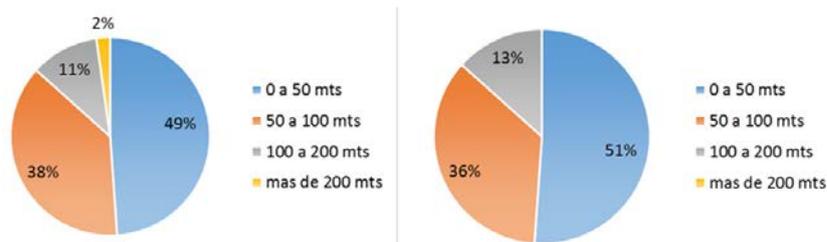


Figura 3. Diversidad de alimentos antes y después de la construcción del *atractor*

Actualmente hay una mayor distribución del rango de edades, pues, aunque para una distancia de 200 metros la cantidad de personas no varía, hay un incremento en el número de personas que recorren al menos 50 metros; además, aunque en una distancia de 300 metros el porcentaje de personas de 20 a 50 años no varía, se registra un incremento de personas entre los 40 y 50 años que recorren hasta, al menos, 50 metros y de personas de 20 a 30 años que recorren de 50 a 100 metros. Estos resultados muestran que la presencia del Parque Explora no ha afectado, en gran medida, este factor, lo que puede deberse a que la cantidad de mini-mercados y tiendas, que se encuentran en el sector, son suficientes para que las personas puedan abastecerse sin tener que recorrer largas distancias. Las personas han creado, por medio de estos locales y negocios, una forma de interactuar con el barrio para satisfacer sus propias necesidades.

En cuanto a la diversidad de transporte, la Figura 4 evidencia que, antes de la construcción del parque, el medio más usado era el bus; sin embargo, con la construcción del Parque Explora se evidencia un mayor uso del sistema de transporte Metro, pues las rutas integradas al sistema y sus alimentadores han facilitado la movilización de los habitantes del sector.

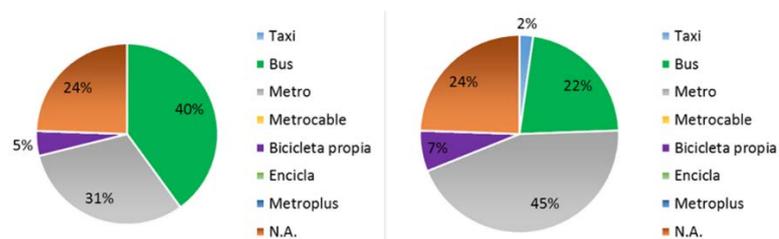


Figura 4. Diversidad en transporte antes y después de la construcción del *atractor*

En lo que se refiere a la diversidad en educación (Figura 5), se tiene que, antes de que se construyera el Parque Explora se percibía más la presencia de los colegios que de universidades, esto posiblemente porque para la época, debido a las condiciones socioeconómicas de esta población, la mayor parte de los vecinos del lugar consideraban suficiente terminar el ciclo académico en el bachillerato.

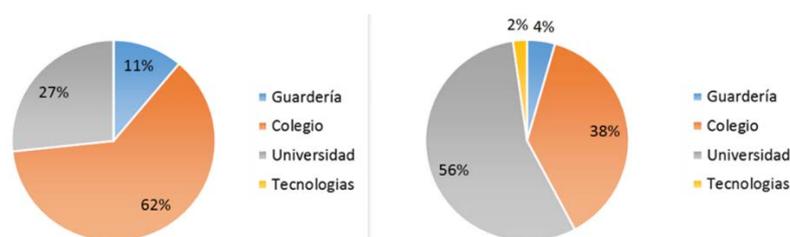


Figura 5. Diversidad en educación antes y después de la construcción del *atractor*

La construcción de este *atractor* ha propiciado más y mejores relaciones entre la comunidad y su entorno, lo que ha permitido un mejor reconocimiento de espacios, lugares y entidades que hacen parte de él, incrementando el deseo de los ciudadanos de hacer parte de ellos y mejorar sus condiciones y calidad de vida.

En relación con la diversidad en recreación, se puede evidenciar, en la Figura 6, que, si bien, antes de que se construyera el Parque Explora los lugares más frecuentados para el esparcimiento eran los parques, después de su construcción aumentó la concurrencia en el sector, pues su diseño y sus múltiples salas interactivas lo hacen más interesante y llamativo para la ciudadanía en general.



Figura 6. Diversidad en recreación antes y después de la construcción del *atractor*

3.2 Conexiones o vínculos

Las conexiones o vínculos son los que determinan las relaciones que se dan en la ciudad a partir del comportamiento de sus actores según Meier [10]. La vinculación contempla el compromiso entre las partes más afectadas y busca una colaboración mutua, lo que contribuye a la definición de un nuevo urbanismo que, de la mano del colectivo y del planeamiento existente, pueda entender mejor los intereses de las partes y fortalezca los vínculos para llegar a un acuerdo efectivo, todo esto partiendo de la pequeña escala, pues el individuo constituye un factor fundamental para el desarrollo adecuado de las relaciones en la red.

Para que una relación adecuada entre la distancia y la escala sea posible, se debe hacer un análisis de la ciudad con respecto a la distribución y tamaño de sus partes, lo cual proporcionará recorridos eficientes y permitirá encuentros y soluciones más acordes para la ciudad y una mayor diversidad de usos. Otro aspecto importante a tener en cuenta es cómo se conecta la ciudad, pues esta debe facilitar la conectividad y favorecer las interacciones humanas en los nodos [12]. Las conexiones, en la ciudad, resultan, entonces, de la necesidad del intercambio de información en la línea de los estudios de Kauffman [14], para lo cual debe establecerse un código que permita una comunicación continua y adecuada que genere vínculos a diferentes escalas.

En la Figura 7 se evidencia que el estado de los vínculos peatonales ha mejorado pues, si bien anteriormente su calidad estaba entre *regular* y *mala*, hoy puede decirse, de manera general, que están en un buen estado de servicio. Cabe mencionar que este *buen* estado se asocia a los vínculos cercanos al Parque Explora pues, con su construcción, surgió la necesidad de mejorar las zonas aledañas, lo que indica que a mayor distancia del *atractor* se siguen encontrando senderos peatonales en *regular* o mal estado.

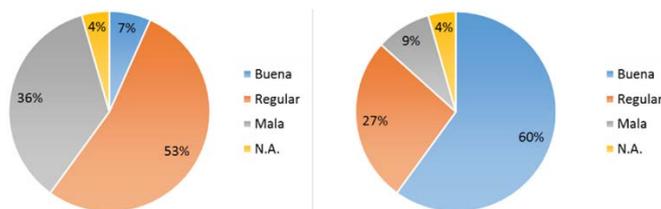


Figura 7. Estado de los vínculos peatonales antes y después de la construcción del *atractor*.

Por otra parte, con respecto a los alcances de estos vínculos peatonales, se evidencia, en la Figura 8, un incremento aproximado del 11% en lo que respecta a las distancias que las personas del sector pueden recorrer de acuerdo con el estado actual de los senderos peatonales; es decir, si bien antes las personas podían recorrer, cómodamente, de 0 a 300 metros, con la construcción del *atractor* estas trayectorias aumentaron, aproximadamente, a una distancia contemplada entre los 300 y 600 metros, lo que indica la eficiencia de las conexiones que se han implementado en torno al *atractor*.

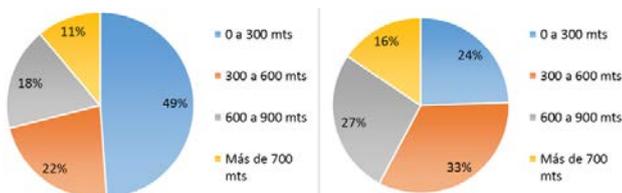


Figura 8. Alcance de los vínculos peatonales antes y después de la construcción del *atractor*

El estado de los vínculos vehiculares no dista mucho de lo que ocurre con los vínculos peatonales. En la Figura 9 se muestra que el estado actual de las calles es relativamente *bueno* con respecto a su condición anterior, el cual estaba entre *regular* y *malo*.

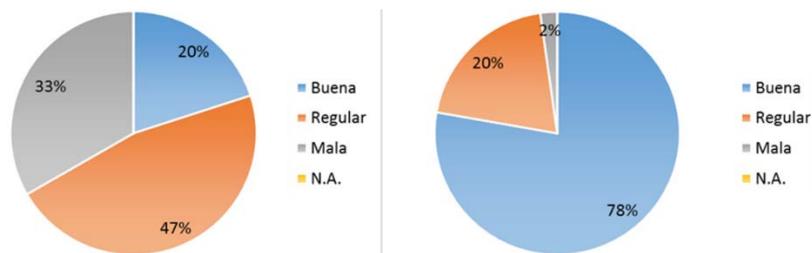


Figura 9. Estado de los vínculos vehiculares antes y después de la construcción del *atractor*

Finalmente, en lo que se refiere a la calle concebida como espacio, se muestra, en la Figura 10, que los habitantes encontraban inseguras las calles del sector pues no era muy concurrido; sin embargo, con la construcción del Parque Explora, no sólo ha mejorado la calidad de vida de la comunidad aledaña, sino que, en la actualidad, el entorno es más agradable y tranquilo para ser visitado por cualquier tipo de persona, lo que contribuye con la seguridad, pues hay una mayor presencia de personas y de policías responsables de atender cualquier percance que se presente en la zona.



Figura 10. La calle como espacio antes y después de la construcción del *atractor*

3.3 Escala

La escala consiste en la jerarquización de los actores que dan vida a la ciudad de acuerdo con sus funciones dentro de la misma. La más importante y pequeña es la del peatón (Hasanov [6]), donde se origina la vitalidad humana que genera el movimiento y la comunicación en la red y se consolidan las escalas mayores según el concepto de Batty y Longley de la ciudad fractal [15].

El campo de acción de las escalas está limitado por su funcionalidad [11], de modo que el que haya una adecuada interacción en la ciudad permite relaciones en distintos niveles y de mayor complejidad (conexiones compuestas – visuales, olfativas, acústicas y táctiles–), y genera sostenibilidad: trayectorias muy largas agotan al peatón, lo que hace importante que se implementen, en trayectos extensos, conexiones adecuadas, por medio de nodos, que complementen sus necesidades y respeten su escala.

En el caso de la ciudad de Medellín se ha hecho frecuente el fenómeno de la emigración a núcleos urbanos situados en la periferia, el cual se ha ido contrarrestando (en la actualidad), con la integración social, que mitiga la desintegración del tejido urbano y elimina la segregación social (la cual destruye los vínculos que complejizaban al sistema: al reducir la diversidad que potenciaba el flujo de información que servía de base para el planeamiento urbano sostenible, en el que predominan la diversidad, la calidad y especificidad del nuevo urbanismo social), que busca concretarse en el nuevo orden urbano de la ciudad de Medellín.

En relación con la escala como factor de complejidad, es importante mencionar que la jerarquización, como se dijo antes, es un proceso de organización que evita el colapso de la red que comienza en la pequeña escala (sendas peatonales) y va hacia las escalas mayores (calles de capacidad crecientes). En la medida en que los vínculos se establezcan de manera eficiente, las conexiones compuestas deberán ser el resultado de interacciones adecuadas que favorezcan la relación entre el peatón y la ciudad. Una eliminación de la escala del peatón, además de poner en riesgo las características del individuo como parte de la ciudad, se eliminan el desarrollo adecuado de escalas mayores, lo que lleva a la generación de conexiones más extensas, en las cuales actúa como mediador el automóvil, pasando este a ser el protagonista de la planificación urbana y relegando al peatón a un segundo lugar.

En la Figura 11 puede observarse que, aunque el automóvil no es uno de los medios de transporte más utilizados por las personas de los alrededores del Parque Explora, antes, también en la actualidad, siguen prefiriendo caminar, actividad que se ha visto favorecida por la comodidad de los senderos, el paisaje, el contacto con otros transeúntes y la seguridad presente en la zona.

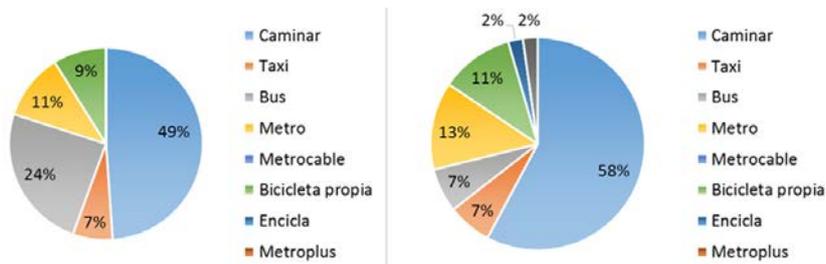


Figura 11. Jerarquización antes y después de la construcción del *atractor*

3.4 Participación

La participación es un proceso de interacción desde el cual se produce orden en el sistema, de modo que su función es regular los procesos de actuación de las partes en las conexiones [6]. Por medio de este mecanismo, y como resultado de la inteligencia colectiva [1], se plantean nuevas soluciones, más eficientes, al problema de adaptación al entorno inmediato y se logra establecer el sentido de ciudad real y viva dentro del concepto de evolución. Las actuaciones sociales en la ciudad, generan nuevas dinámicas que toman forma de *atractor*, pues, desde las actuaciones de los individuos, se da origen a un nuevo tipo de orden que representa, a la vez, un nivel superior de complejidad.

Tener en cuenta a la sociedad, y permitir que se apropie de su ciudad a través de la participación, permite concebir un punto de vista, desde la experiencia y el conocimiento común, a favor del urbanismo. De allí, el origen y la configuración de una inteligencia colectiva que apunta a la resolución de problemas de manera eficiente como una propiedad mucho más dinámica (Lewin [16]). La inclusión de la ciudadanía representa, además, importantes procesos de cooperación público-privada, de donde se obtiene como resultado un equilibrio institucional en beneficio de las necesidades de los ciudadanos.

Por medio de la participación se hace posible la identificación de los problemas barriales y se logra la incidencia en los procesos urbanos y la toma de medidas para darles solución. En la Figura 12 se evidencia un incremento del 20% en el interés de las personas por hacer parte de los procesos urbanos de su sector con respecto al tiempo pasado, es decir, antes de la presencia del Parque Explora en la zona, lo cual se debe a las nuevas características del entorno y el cambio en el ambiente.



Figura 12. Participación en procesos urbanos antes y después de la construcción del *atractor*.

El sentido de pertenencia también ha mostrado una tendencia a aumentar, pues, aunque antes de la construcción del *atractor* la comunidad se mostraba en su mayoría interesada en participar en el desarrollo del barrio, en la Figura 13 se puede observar un incremento favorable como respuesta de la comunidad.



Figura 13. Sentido de pertenencia antes y después de la construcción del *atractor*

La construcción de viviendas en la zona, es otra forma de manifestación de la participación ciudadana. En la Figura 14 se muestra que, aunque la participación de los vecinos en este tipo de acciones, tanto antes como después de la construcción del Parque Explora, no ha sido muy alta ya que cada quien tiene sus propios intereses asociados al espacio y modo de vida, en ocasiones puede darse la intervención de algunos vecinos en la construcción de las viviendas de otros, si estos lo requieren; sin embargo, dicha participación no representa una obligación, pues se respetan los espacios de cada uno. En esta forma de participación, a manera de democracia, se establecen acuerdos y desacuerdos que aportan complejidad a la ciudad y permiten que los valores colectivos den un verdadero sentido a todo el sistema.



Figura 14. Participación en la construcción de vivienda0073 antes y después de la construcción del *atractor*

3.5 Sistemas emergentes

Los sistemas emergentes se entienden desde la configuración elemental de un sistema y dan paso a la creación de nuevos espacios que resultan de los procesos de expansión y que deben adaptarse a los nuevos mecanismos de modernización urbana que se implementan en la ciudad (según los estudios de sistemas emergentes [17], y de estructuras fractales según Prigogine [18]). En este factor convergen los anteriores: diversidad, conexiones o vínculos, escala y participación. Desde los pequeños nuevos espacios que se configuran al interior de la ciudad, contribuyen a su complejización como sistema, configurando patrones de organización basados en los intereses de los ciudadanos, los cuales generan una importante relación del todo con las partes, estableciéndose importantes vínculos de carácter social en el proceso de transformación de la ciudad. Desde el punto de vista del urbanismo contemporáneo, se trata de una manifestación informal (cuya constante es el cambio) que genera complejidad en un territorio que se auto-organiza como un sistema caótico y que busca el bienestar colectivo.

Además de estos factores aparecen conceptos asociados que aportan resultados importantes al análisis de la complejidad, propia del sector donde se encuentra ubicado el Parque Explora, tales como el concepto de *atractor*, que se manifiesta como una expresión social que, en el lugar de encuentro, reconoce nuevas actuaciones urbanas [19], las cuales, mediante la participación, ayudan a entender el nuevo orden social que se integra a la ciudad, como parte del sistema, y que genera en ella nuevas dinámicas, confiriendo complejidad al sistema [18]. Desde el punto de vista de este concepto hay tres aspectos desde los que se puede determinar la complejidad que el Parque Explora aporta al sector, como *atractor*, que son:

1. En primer lugar, está el beneficio que representa para la comunidad, pues los *atractores*, más allá de crear sólo flujos, crean puntos de encuentro al configurar escenarios colectivos y otorgan al entorno el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes del sector. En la Figura 15 se puede observar que el Parque Explora ha contribuido en un 42%, a la calidad de vida del sector, seguido de un 27% que corresponde al encuentro social. Este *atractor* se ha convertido en un espacio agradable en el que se puede compartir con la familia y los amigos con tranquilidad. Por otra parte, hay que considerar que la imagen del barrio no se ha visto afectada en gran medida. Otros aspectos relacionados, que han contribuido con el mejoramiento de la imagen del barrio son el transporte, el encuentro social, y la educación.



Figura 15. Beneficio y afectación total del sector con la construcción del *atractor*

2. En segundo lugar, está el *encuentro*, el cual ocurre en senderos apropiados para el peatón y, junto con el entorno, que puede variar de acuerdo con los nodos, la clase de habitantes que frecuentan el sector, los prejuicios de las clases sociales y los niveles de seguridad, configura una red que forma parte del sistema dándole identidad [20]. La Figura 16 evidencia que el Parque Explora es un proyecto que ha propiciado el encuentro familiar en un 49%, aproximadamente, y el turismo en un 29%. Para fomentar el uso de este tipo de parques es importante que se implementen estrategias de difusión de sus ofertas con el fin fortalecer el vínculo *atractor*-entorno y se pueda lograr un equilibrio en la demanda de los usuarios. Este tipo de espacios no deben suplir otras actividades; por el contrario, deben potenciar las conexiones que existen a su alrededor, promoviendo la retroalimentación de las demás actividades, pues la función del parque debe ser la de complemento, y no la de suplemento, a lo que se suma la idea de Jacobs [9], quien afirma que *los parques usados de una manera muy pública y generalizada presentan, por lo general, cuatro elementos: combinación de usos, centralidad, sol y (un cierto) recogimiento* [8]. Estos elementos lo hacen más identificable, haciendo que emerja un orden alrededor de las actividades y necesidades de la población concurrente.

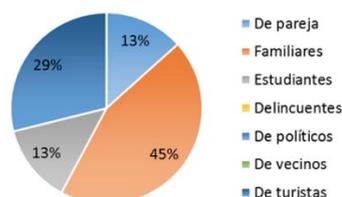


Figura 16. Encuentros después de la construcción del *atractor*

3. Por tercer lugar, está la *pertenencia al atractor*, pues siendo la participación un factor fundamental para el desarrollo de una comunidad, cabe mencionar que también es ella –la participación– la que evidencia el sentido de pertenencia que existe en los habitantes por el lugar en que habitan. La aparición del Parque Explora en la comuna nororiental de la ciudad, ha despertado el interés de los habitantes del sector, lo que ha significado una mayor participación ciudadana pues la comunidad se ha visto más involucrada en las decisiones relacionadas con los procesos urbanísticos que se llevan a cabo en su entorno. En la Figura 17 se puede ver la opinión que tiene la comunidad acerca de la presencia del parque, de acuerdo con lo cual se tiene que un 38% de la población del sector lo aprovecha para caminar por sus alrededores y el 26% está de acuerdo con que el *atractor* cumple la función de identificar al barrio y hace que se sientan cómodos sentándose cerca a disfrutar de una tarde.



Figura 17. Sentido de pertenencia y relación con el *atractor*

3.6 Seguridad

El concepto de seguridad en la comunidad, reconoce dos aspectos importantes: por una parte, está la noción de *vecindad y pertenencia barrial*. La vecindad hace referencia a la capacidad que tiene cada uno de los habitantes del sector para identificar a sus vecinos y delimitar distancias de este conocimiento. La Figura 18 pone en evidencia el conocimiento que tienen o no, los habitantes del sector, de sus vecinos y hasta qué distancia, aproximadamente, pueden reconocerlos. Como resultado se tiene que, aunque el Parque Explora no ha intervenido mucho en este aspecto, pues el reconocimiento de los vecinos no ha dependido de su presencia, en la actualidad se observa un pequeño incremento, aproximadamente del 20%, en la identificación del conocimiento de los vecinos, la cual se da en una distancia aproximada de 500 metros a la redonda. Por otra parte, está la *pertenencia barrial*, de acuerdo con la cual la comunidad identifica diversas formas de contribuir con la seguridad del barrio.

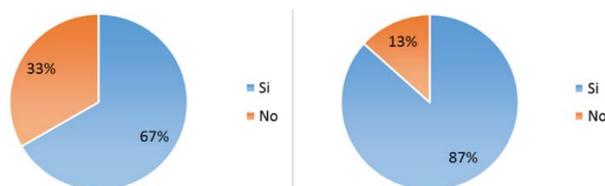


Figura 18. Concepto de vecindad antes y después de la construcción del *atractor*

En la Figura 19 se muestra que, antes de la construcción del Parque Explora el porcentaje de habitantes del sector que acudía a las autoridades ante alguna eventualidad era tan sólo del 38%, el 31% era indiferente al problema y el 27% de las personas trataban de solucionar el problema informando a los vecinos. En la actualidad, el 53% de los habitantes del barrio prefieren informar a las autoridades pertinentes acerca de un evento que requiera de su presencia, aunque el 40% prefieren ser indiferentes ante este tipo de eventos o informan a los vecinos para que intervengan y den solución al inconveniente que se esté presentando. Estas diferencias se deben a que ahora las personas se sienten un poco más seguras, al contar con la presencia de las autoridades, pues antes preferían ser indiferentes al problema o sólo contar con sus vecinos por temor a que se desataran represalias contra ellos.

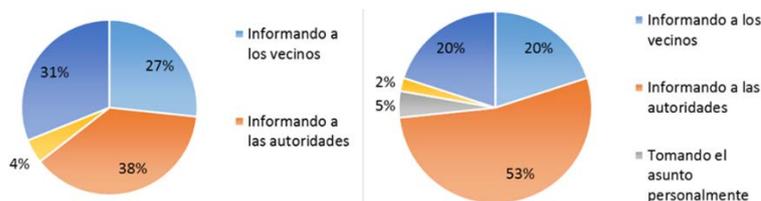


Figura 19. Pertenencia barrial antes y después de la construcción del *atractor*

3.7 Límites

Los límites son definidos por los habitantes del sector y se definen de acuerdo con el espacio y la distancia que tienen la capacidad de reconocer [21]. Esta facilidad de reconocer los límites del barrio, en la mayoría de los casos, se debe a que gran parte de los habitantes que viven allí ocupan este lugar, por lo menos, desde hace 3 años, lo cual implica que tienen un mejor conocimiento de su entorno. La Figura 20 muestra que, en la actualidad, la mayoría de las personas tienen un mayor conocimiento sobre los límites de su barrio, lo cual implica que reconocen las distancias en las que pueden sentirse seguras, las cuales están definidas, en promedio, en un kilómetro a la redonda.

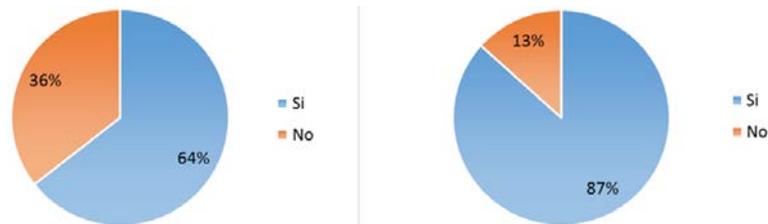


Figura 20. Límites antes y después de la construcción del *atractor*

3.8 Análisis de transformación desde la complejidad

En la Figura 21 se pueden observar las distancias en las cuales se logró realizar el presente estudio y los lugares que se vieron intervenidos, o más directamente relacionados, con la implementación del Parque Explora. El énfasis se hizo en el sector nororiental de la ciudad.

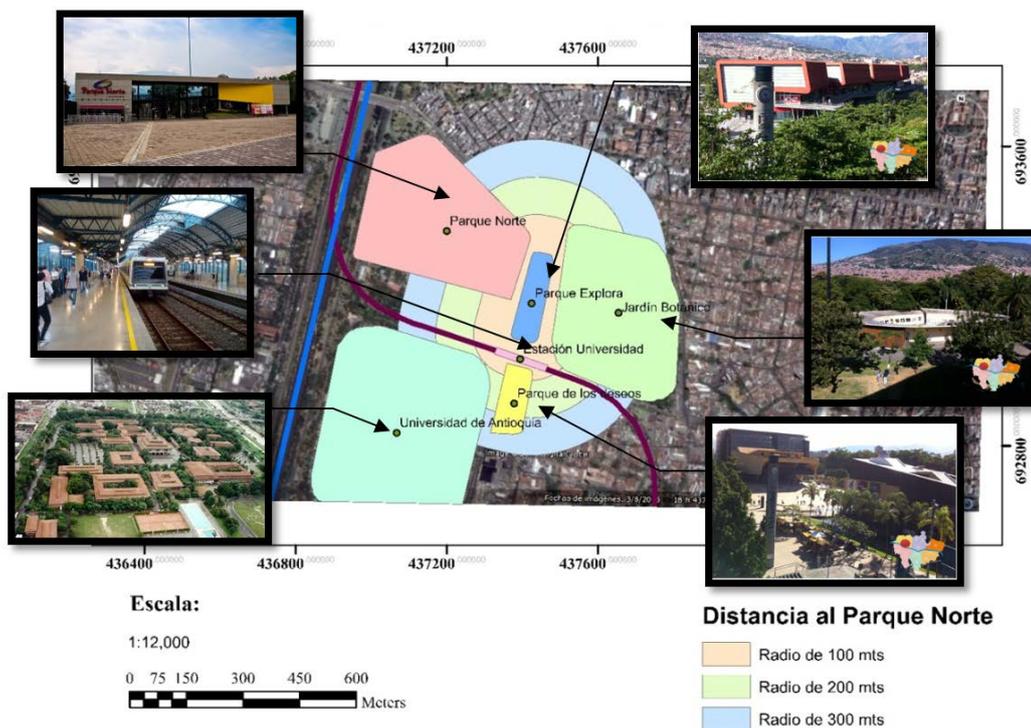


Figura 21. *Atractores* emergentes, nodos emergentes complementarios y conectividad con el sistema emergente complementario

De los resultados mostrados anteriormente se tiene que, antes de la construcción del *atractor*, en los alrededores de la Universidad de Antioquia no había una importante diversidad en lo que respecta al transporte y al comercio; sin embargo, podía identificarse una mayor diversidad mientras mayor fuera la distancia en relación con la ubicación actual del parque. Con el paso del tiempo, y con la llegada del parque al sector, estas condiciones han mejorado notablemente, pues, aunque la diversidad se hacía más evidente en una distancia importante, con respecto al punto de referencia –el Parque Explora–, se ha evidenciado un aumento de la diversidad en lugares más cercanos a este gracias a las mejoras en el entorno y la accesibilidad.

La seguridad en el sector es otro aspecto que se ha visto influenciado positivamente con la presencia de cámaras de seguridad y personal de la policía. En lo que se refiere a los vínculos, en la actualidad, el cambio en el aspecto de las calles y los senderos peatonales ha incentivado el cuidado del entorno y la participación de la comunidad en los procesos de mejoramiento como parte de la apropiación del espacio, asociando el estado actual de los senderos y las calles con ideas de convivencia y movilidad.

4. CONCLUSIONES

La sectorización de actividades en la ciudad, como tentativa de simplificarla, elimina la complejidad funcional de su estructura. La experiencia del transeúnte se potencia en los encuentros que ocurren en las trayectorias que se dan en la escala del peatón, lo que exige que la ciudad debe permitir la movilidad de los individuos, pues esta se trata de un sistema cuya complejidad resulta, y se engrandece, de la relación entre sus partes: su estructura se define a partir del continuo intercambio.

Los *atractores*, en la ciudad, como el caso de El Parque Explora, tienen la función de permitir la relación entre los individuos y el entorno, trazando trayectorias vivas entre los nodos, que se enriquecen con la participación ciudadana y la apropiación del espacio y otorgan equilibrio al sistema. Dichas trayectorias ayudan a definir, de forma eficaz, el flujo de información, y, mediante una adecuada y constante retroalimentación, determinan la estructura más acorde a un cometido. Las relaciones complejas, como parte del resultado del intercambio de información, devienen de diversas interacciones en las que cada proceso genera una evolución en el sistema, y el estudio de las múltiples variables que resultan de ellas, amplía el espectro de transformaciones posibles (diferente de lo que ocurre con las estructuras simples en las que la linealidad ofrece pocas variables y las hace frágiles debido a las mínimas conexiones). En este punto, la participación ciudadana y la inteligencia colectiva ayudan a definir las bases de las relaciones que persisten en la complejidad de la ciudad, las cuales sirven de fundamento para establecer un nuevo concepto de urbanismo cívico, caracterizado por la auto-organización que otorgan al sistema los vínculos eficientes que emergen del colectivo y en cuya interpretación urbana, por encima del orden (condiciones iniciales del sistema –planes urbanos–), prevalece el caos.

La planificación en la ciudad debe superponerse a su comportamiento, independientemente del fracaso o el éxito de las intervenciones que se hagan en ella. En el caso del fracaso en los planes urbanísticos, cabe mencionar que este se desencadena de soluciones que ignoran el curso natural del proceso evolutivo de la ciudad y que buscan satisfacer, de manera inmediata, problemas que resultan de un desarrollo acelerado y forzado, además de artificioso, del entorno. No buscar una solución radical y contundente a un problema real puede terminar volviendo rígido y estéril al sistema, además de provocar una importante falta de conciencia en lo que respecta a la evolución de las ciudades vivas. Lo anterior no quiere decir que en los sistemas que evaden el planeamiento prevalece la vida por una continua autorregulación a la que da paso la permanente participación ciudadana y la adecuada valoración de los espacios eficientes. En el caso de Medellín, esta complejidad persiste en el planeamiento, definido para la ciudad, aun cuando su grado de auto-organización es más complicado ya que no adquiere el valor espontáneo de los procesos por fuera del planeamiento, los cuales significan un mayor grado de implicación ciudadana en los procesos que se implementan, pues lo que ocurre es que el colectivo es el que hace mutar al planeamiento existente para dotarlo de complejidad mediante los vínculos adecuados. En este sentido es el planificador quien debe predeterminedar las actuaciones e intereses de un colectivo específico que se manifiesta con sentimientos de abandono asociados a aspectos estéticos, vinculados a una sociedad que se organiza por medio de la segregación, potencia la división en clases sociales y sectoriza los niveles de seguridad en la ciudad, todo esto relacionado con una idea de bienestar que es directamente proporcional a los estratos sociales y que no tiene en cuenta la riqueza que ofrece la inteligencia colectiva. Con las actuaciones espontáneas ocurre lo mismo, pues, dentro del prejuicio social, son tratadas como tumores urbanos y se recurre a un maquillaje que busca taparlas como si fueran actuaciones defectuosas, pues existe una alta preocupación por el aspecto exterior que deja de lado el interés por el funcionamiento real de la ciudad.

Tomando como referencia las valoraciones del colectivo es posible obtener, como resultado, un proceso de carácter evolutivo en la ciudad, determinado por la crisis, dentro del concepto de apropiación urbana, en el que orden y el caos se complementan a través de la estructura. En este sentido, el estado de la ciudad depende de los procesos sociales a los que aporta la ciudadanía un alto grado de intercambio, por medio de la participación, en relación con las circunstancias que acontecen, pues el sistema, en medio de la crisis, impulsa la evolución a través de la transformación social, distinto de lo que ocurre en los procesos de planeación clásica abstracta, la cual se busca tratar los problemas de individualmente, impidiendo definir una identidad para la ciudad.

Con el estudio se estimó que la tasa de producción diaria de condensados es un poco más de 2 m³/día, que proyectados a un año resultan del orden de 700 m³. Considerando un consumo promedio diario por persona para la población donde se ubica el campus universitario de 140 L/día, el volumen de agua de condensados recuperados para usar en riego equivalen al consumo de agua potable de 14 personas en un día, y alrededor de 5000 personas si se proyecta a un año. Recuperar los condensados para usarlo en el riego de pastos permitirá disminuir la presión ejercida sobre la fuente hídrica natural del cual se abastece el acueducto municipal, a la vez que permitirá disminuir tanto el consumo como el monto de pago del agua potable que se registra hoy en día en la institución educativa.

Respecto a la calidad del agua de condensados, se determinó que es apta para usarse en labores de riego de jardines y césped sin requerir tratamiento adicional. Los análisis mostraron niveles adecuados de nutrientes, como los reportan en otros estudios, por lo que puede ser útil para el crecimiento y manutención de la cobertura vegetal de zonas verdes. Así mismo, en algunos estudios se ha establecido que su calidad es similar a la del agua destilada e

incluso en algunos proyectan que aplicándoles procesos de desinfección tienen un uso potencial para consumo humano.

Se realizó dimensionamiento hidráulico de elementos del sistema de riego que incluye, entre otros, tuberías, accesorios para control de flujo, tanque para almacenamiento (cap. 2000 L), by pass, equipo de presión (pot. 750W - 110VCA) y controlador de riego con sus respectivas electroválvulas y aspersores tipo emergentes. Se determinó que el sistema de riego opere solo en las horas de la noche para evitar al máximo la evaporación del agua, además de evitar causar molestias a usuarios de las instalaciones.

Con niveles favorables de irradiación solar, 4.87 kWh/m²/día, y para las 7 horas de sol por día que registra la zona donde se ubica el estudio, se desarrolló una configuración operando fuera de red con energía fotovoltaica. Se espera que la implementación de energía autosustentable para el funcionamiento de los equipos de presión y control de riego generen un efecto positivo sobre el medio ambiente, brindando un sistema con energía limpia, renovable, sin emisiones contaminantes y sin pago periódico de consumo de servicio eléctrico. Además, con la automatización del sistema de riego se busca la autonomía necesaria para que la intervención de personal de apoyo solo sea necesaria en actividades de mantenimiento rutinario y preventivo del sistema. En caso que se requiera aumentar el nivel de desempeño del sistema, podría programarse para que, en vez de atender en un mismo día la demanda de la Zona 1 y Zona 2, solo se atienda la de una zona y al día siguiente la de la otra.

El presente estudio contrasta con la marcada tendencia de los documentados en las referencias, donde prevalecen aquellos registrados en zonas climáticas subtropicales que tienen cuatro estaciones climáticas. El sitio donde se desarrolló el presente estudio se ubica en plena zona tropical y se destaca la característica de no registrar drásticas variaciones de temperatura ambiente a lo largo del año que, por ser elevadas - aproximadamente 29°C -, conducen a la particularidad que en los recintos de edificaciones se cuentan con equipos de climatización que operan con energía obtenida, en su mayoría, por la combustión de combustibles fósiles. Por lo anterior, para aquellas zonas urbanas o rurales ubicadas en regiones donde se presente escasez del agua y se registren condiciones climáticas similares a las del sitio de estudio, la alternativa propuesta para el aprovechamiento de los condensados para riego automatizado de jardines puede utilizarse como una guía que permita replicar, escalar y adaptar dicha configuración.

REFERENCIAS

- [1] Imottesjo, H. y Kain, J. (2018). The Urban CoBuilder – A mobile augmented reality tool for crowd-sourced simulation of emergent urban development patterns: Requirements, prototyping and assessment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 71, 120-130.
- [2] Engelen, G. (1998). The theory of self-organization and modelling complex urban systems. *European Journal of Operational Research*, 37(1), 42-57.
- [3] Abbas, H. et al. (2018). Systems thinking for developing sustainable complex smart cities based on self-regulated agent systems and fog computing. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 19, 204-213.
- [4] Fritjof, C. y Pier Luigi, L. (2014). *The Systems View of Life: A Unifying Vision*. Cambridge University Press.
- [5] Human Systems Dynamics Institute, Complex Adaptive System. Recuperado: <https://www.hsdinstitute.org/assets/documents/5.1.1.4.complex-adaptive-system-04may16.p>.
- [6] Hasanov, M. y Zuidema, C. (2018). The transformative power of self-organization: Towards a conceptual framework for understanding local energy initiatives in The Netherlands. *Energy Research & Social Science*, 37, 85-93.
- [7] Heylighen, F. (2013). Self-organization in communicating groups: the emergence of coordination, shared references and collective intelligence. *Computer Science*, 89, 117-149.
- [8] Rivero, J. (2015). En busca de otro urbanismo en la ciudad colombiana de Medellín (Entre complejidad y orden). *Disertación doctoral*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- [9] Jacobs, J. (1973). *Muerte y vida de las grandes ciudades*. - Capitán Swing.
- [10] Meier, R. (1962). *A Communications Theory of Urban Growth*. MIT Press.
- [11] Alexander, C. (2010). A City is Not a Tree, in *Architectural Forum* 122, 1, 58-61. Recuperado: <https://www.patternlanguage.com/archives/alexander1.htm>.
- [12] Salinger, N. (2005). *Principles of urban structure*. Techne Press.
- [13] Rivero, J. (2016). Análisis desde las teorías de la complejidad y el caos aplicadas al caso del parque explora (Medellín) como atractor. *Tesis de maestría*. Universidad de Antioquia.
- [14] Kauffman, S. (1995). *At Home in the Universe*. Oxford University Press.
- [15] Batty, M. y Longley, P. (1994). *Fractal Cities*. Academic Press.
- [16] Lewin, R. (2002). *Complejidad, el caos como generador de orden*. Tusquets Editores.
- [17] Johnson, S. (2003). *Sistemas Emergentes. Qué tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software*. Turner.
- [18] Prigogine, I. (2002). *¿Tan solo una ilusión?* Tusquets Editores S.A.
- [19] Mongin, O. (2006). *La condición urbana: La ciudad a la hora de la mundialización*. Paidós.
- [20] Claudel, P. (1974). *Connaissance de l'Est suivi de L'Oiseau noir dans le soleil levant*. Collection Poésie/Gallimard.
- [21] Krier, L. (2013). *La arquitectura de la comunidad*. Reverté SA.

Propuesta e implementación de un Building Information Modeling BIM Room

Oscar Fernando Rosas Crespo
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA
Colombia

El Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera CTCM, del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA está localizado en el extremo suroccidental del Distrito Capital donde la demanda de personal técnico para el sector de la construcción es amplia. La evolución en las metodologías colaborativas para la ejecución de proyectos de construcción ha generado la necesidad de articular los procesos de aprendizaje con las herramientas informáticas. Por tal motivo, el grupo de investigación del CTCM SENA Bogotá junto con la Coordinación de Construcción e Infraestructura, han formulado una propuesta para la implementación de Building Information Modeling (BIM Room) en el Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera. La propuesta consiste en implementar un ambiente de aprendizaje BIM Room, en el cual, los aprendices con el apoyo de los instructores desarrollen un proceso de aprendizaje a partir de la metodología BIM. Con el desarrollo de esta propuesta se fortalecerán y actualizarán los conocimientos relacionados con el seguimiento y control en tiempo real de proyectos de construcción bajo los estándares de calidad establecidos en la normatividad vigente.

1. INTRODUCCIÓN

El CTCM SENA, es un centro de formación donde la comunidad tiene la posibilidad de acceder a programas de formación integral profesional en áreas relacionadas con el sector de la construcción; cuenta con los ambientes de aprendizaje requeridos para ejecutar los procesos de adquisición de conocimientos, destrezas, y como se puede ver en la Figura 1, también cuenta con espacios para el desarrollo de actividades físicas y de recreación.



Figura 1. Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

El SENA en su misión, está encargado de cumplir la función que le corresponde al Estado de invertir en el desarrollo social y técnico de los trabajadores colombianos, ofreciendo y ejecutando la formación profesional integral, para la incorporación y desarrollo de las personas en actividades productivas que contribuyan al desarrollo social, económico y tecnológico del país [1].

En la actualidad, los instructores y sus recursos didácticos han sido puestos a prueba, la transformación acelerada de los procesos de formación y la migración hacia ambientes virtuales de aprendizaje, dejan ver la importancia de las herramientas informáticas. En ese orden de ideas, resulta necesario realizar la integración de los procesos formativos a metodologías donde se puedan desarrollar modelos que cumplan con las características de la formación por competencias, que permitan evaluar resultados de aprendizaje a partir de pruebas de conocimientos, pruebas de desempeño en la ejecución de actividades y pruebas de calidad de los productos finales.

En la metodología BIM se establecen bases para la construcción de modelos con características paramétricas, cuenta con formas geométricas simples del modelado en tres dimensiones y permite incorporar aspectos técnicos en tiempo real. Por otra parte, la metodología BIM permite generar dimensiones adicionales como la programación de obra, el espacio físico, el costo, el análisis de impacto al medio ambiente, la eficiencia energética y el mantenimiento durante el periodo de vida útil del proyecto de construcción.

SENNOVA Es el Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico a través del cual se ejecuta la política de contribución del SENA a la Ciencia y Tecnología del País; fortaleciendo capacidades locales en productividad, competitividad, generación de conocimiento y pertinencia de la Formación Profesional Integral impartida en la

institución. SENNOVA busca generar capacidades para la investigación aplicada y desarrollo experimental en los Centros de Formación del SENA, a través del desarrollo de proyectos de ciencia, tecnología e innovación en las diferentes líneas programáticas del sistema, y a su vez articular y transferir capacidades de innovación, productividad y competitividad a las empresas [2].

Conforme a la problemática expuesta anteriormente, el Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo SENNOVA del Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera, junto con la Coordinación de Construcción e Infraestructura, han formulado una propuesta para implementar un ambiente de aprendizaje BIM ROOM, en el cual, los aprendices guiados por los instructores integren las prácticas con el seguimiento y control, orientado a la ejecución de procesos constructivos adecuados.

Este documento tiene el propósito de exponer los fundamentos que dan origen a la propuesta e implementación de Building Information Modeling (BIM Room) en el Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera. Se expone la problemática actual en el sector de la construcción a partir de la revolución de las herramientas informáticas y virtuales; continúa con los marcos de referencia, conceptual y legal que soportan la propuesta y finaliza con la descripción de aspectos técnicos requeridos para su implementación.

2. MARCO DE REFERENCIA

- *Conferencia magistral sobre la importancia de la metodología BIM.* En septiembre del 2018, en el Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera se realizó una conferencia magistral con la participación del arquitecto español José Luis Rodríguez Antúnez orientado a la importancia de la metodología BIM en el avance del sector de la construcción y el desarrollo de infraestructuras en Latinoamérica.
- *Participación en el BIM Forum liderado por CAMACOL.* El Servicio Nacional de Aprendizaje SENA hace parte del BIM Forum liderado por la Cámara Colombiana de la Construcción CAMACOL y planea para la vigencia 2020 - 2021 la implementación de nueve aulas BIM en los diferentes centros de formación del SENA a nivel nacional, con equipos tecnológicos y software especializado de última tecnología, que permitiría capacitar a un importante número de aprendices impulsando la industria de la construcción en Colombia.
- *Seminarios de la empresa CYPE.* CYPE es una empresa que desarrolla y comercializa software técnico para los profesionales de la arquitectura, ingeniería y construcción. En 2019 se realizaron diferentes seminarios con Armando Riquelme, representante de la empresa CYPE, se realizaron simulaciones en entornos colaborativos BIM para proyectos de construcción que integraron el diseño arquitectónico con las instalaciones técnicas (hidráulicas, sanitarias, gas y redes contra incendios). Durante el desarrollo del seminario se contó con la participación de instituciones como la Universidad de los Andes, Universidad Piloto, UniAgraria, Universidad Distrital, y la participación del Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera del SENA.
- *Elaboración de proyectos BIM desde el CTCM Sena Bogotá.* CTCM Sena Bogotá es el grupo de investigación del Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera que conforme al análisis para la medición de investigación de la convocatoria 781 de 2017 de COLCIENCIAS ha recibido la categoría C como grupo reconocido por el ente rector a nivel nacional en ciencia y tecnología. El Grupo de Investigación CTCM SENA Bogotá y sus semilleros asociados han elaborado proyectos como el Estudio Metodológico BIM para el Desarrollo de Proyectos Urbanísticos, así como el proyecto de Eficiencia Energética Eco Sostenible en el Diseño Arquitectónico a través de BIM.
- *Comparación de Tecnología CAD vs BIM para proyectos de construcción, arquitectura e ingeniería.* Este proyecto tuvo el objetivo de comparar dos métodos de diseño; el primer análisis utilizando Building Information Modeling (BIM) y el segundo análisis utilizando Computer Aided Design (CAD). Los dos modelos del proyecto multifamiliar de cinco pisos denominado Suite 30 permitieron comparar cantidades de materiales, presupuesto y el tiempo requerido para el diseño; su tuvieron en cuenta cinco etapas (investigación, diseño, cálculo de cantidades, tiempo y presupuesto). Se pudo concluir que la metodología BIM es más sencilla y eficaz, pues permite agilizar los procesos de diseño.

Para realizar un comparativo entre ambas metodologías, se realizó la revisión bibliográfica en la cual se tomó el valor por metro cuadrado de la investigación realizada por el Arquitecto Manuela Fernando Salazar Alzate para estimar el rendimiento promedio por hora de un ingeniero de costos con conocimientos en BIM. Adicionalmente se tomó el informe de AUTODESK sobre productividad, se descontó e incremento en productividad para el ingeniero de costos sin conocimientos de BIM y se determinaron los rendimientos [3] llegando al resultado que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Rendimientos por hora y día [3]

Metodología	Valor hora	Estimado hora	Estimado día
Tradicional 2d	12750	2,07 m ² /h	16,58 m ² /día
Bim 3d	16575	2,76 m ² /h	22,1 m ² /día

3. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

3.1 La metodología BIM

Conforme a lo expuesto por [4], Building Information Modeling es un nuevo acercamiento al diseño, construcción y gestión de los edificios. Se trata de una metodología que enfoca desde un punto de vista diferente el modo de entender los edificios, cómo estos funcionan y la manera en la que estos mismos se construyen. Se podría pensar en la Revolución Industrial del siglo XXI en lo que a la industria de la construcción se refiere [4].

La marca Ingeniería Asistida por Computador IAC que está orientada a las empresas de industrias de construcción y manufactura que quieren transformar su modelo de negocio eliminando pérdidas y aumentando la productividad, define el concepto de Building Information Modeling (BIM) como un proceso usado en la industria de la construcción que permite a todos los involucrados trabajar sobre un único modelo digital del proyecto de forma colaborativa y concurrente. Permite gestionar la información necesaria para diseñar, construir y operar el proyecto en todo su ciclo de vida [5]. Durante la conferencia magistral desarrollada en el septiembre de 2018 en el Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera del SENA, el arquitecto español José Luis Rodríguez Antúnez afirmó que la metodología BIM *se basa en el uso de información coordinada, coherente y computable, relativa a las características físicas y funcionales de un edificio o infraestructura, que fluye desde la génesis y el desarrollo de los proyectos hasta su construcción y mantenimiento* [6].

Se establecen entonces las bases para realizar un modelo con características paramétricas, en donde además de contar con las formas geométricas simples del modelo en 3D, pueden incorporarse datos reales (como por ejemplo propiedades de materiales, costos unitarios, tiempos de instalación) que facilitan la concepción integral de los proyectos de construcción. La incorporación de estos nuevos parámetros a los modelos genera nuevas dimensiones adicionales a la 3D, en donde además propiedades geométricas tridimensionales del proyecto, se puede incluir la programación de obra, es decir el tiempo (4D), el espacio físico y el costo (5D), el ciclo de vida del proyecto con los análisis de impacto al medio ambiente como la eficiencia energética (6D), y el mantenimiento o Facility Management que permite el control logístico del proyecto durante su vida útil (7D) [7].

De acuerdo a las definiciones expuestas anteriormente se pueden identificar beneficios de la metodología BIM. Permite realizar seguimiento y control a la ejecución de proyectos de construcción desde los estudios previos, pasando por la materialización hasta la gestión del mantenimiento y operación. Permite reducir pérdidas y aumentar la productividad durante todo el ciclo de vida de la construcción a partir de información coordinada, coherente y computable a partir de características físicas y funcionales de la construcción que fluye desde la génesis y el desarrollo de los proyectos hasta su construcción, mantenimiento y demolición.

3.2 Concepto de investigación

Se entiende el concepto de investigación como el proceso mediante el cual se realizan actividades intelectuales y experimentales de modo sistemático, con el propósito de aumentar los conocimientos sobre una determinada materia. La investigación puede ser definida como una serie de métodos para resolver problemas cuyas soluciones necesitan ser obtenidas a través de una serie de operaciones lógicas, tomando como punto de partida datos objetivos. Es un estudio sistemático y objetivo de un tema claramente delimitado, basado en fuentes apropiadas y tendientes a resolver problemas o cuestionamientos [8].

3.3 Investigación básica

La investigación básica, pura, teórica o dogmática, se caracteriza porque parte de un marco teórico; la finalidad radica en formular nuevas teorías o modificar las existentes, en incrementar los conocimientos científicos o filosóficos, pero sin contrastarlos con ningún aspecto práctico [9].

3.4 Investigación aplicada

La investigación aplicada tiene por objetivo la generación de conocimiento con aplicación directa y a mediano plazo en la sociedad o en el sector productivo. Este tipo de estudios presenta un gran valor agregado por la utilización de conocimiento que proviene de la investigación básica. De esta manera se genera riqueza por la diversificación y progreso del sector productivo. Así, la investigación aplicada impacta indirectamente en el aumento del nivel de vida de la población y en la creación de plazas de trabajo [10].

3.5 Investigación formativa

El tema de la denominada investigación formativa en la educación superior es un tema-problema pedagógico. Aborda, en efecto, el problema de la relación docencia-investigación o el papel que puede cumplir la investigación en el

aprendizaje de la misma investigación y del conocimiento, problema que nos sitúa en el campo de las estrategias de enseñanza y evoca concretamente la de la docencia investigativa o inductiva o también el denominado aprendizaje por descubrimiento. Por tratarse de un problema pedagógico y didáctico es menester iniciar su estudio desde las estrategias de enseñanza, ya que su presencia es consustancial, como ya se sugirió, a una de las grandes vertientes o estrategias de enseñanza: la de aprendizaje por descubrimiento y construcción [11]. La investigación formativa es una categoría de análisis que corresponde a la pedagogía y en particular a la visión que defiende la capacidad de aprendizaje autónomo, la capacidad de aprender por medio de la interrogación, sustentada en las competencias para aprender por medio de la pregunta y la exploración más que un método expositivo [12].

3.6 Desarrollo experimental

El desarrollo experimental consiste en trabajos sistemáticos que aprovechan los conocimientos existentes obtenidos de la investigación y la experiencia práctica, y está dirigido a la producción de nuevos materiales, productos o dispositivos; a la puesta en marcha de nuevos procesos, sistemas y servicios, y mejora de los existentes [13].

4. MARCO LEGAL

Conforme al decreto 585 de febrero 26 de 1991, por el cual se crea el consejo nacional de ciencia y tecnología, se reorganiza el instituto colombiano para el desarrollo de la ciencia y tecnología Colciencias y se dictan otras disposiciones, en el título III Disposiciones Varias, indica que *Corresponde a las entidades oficiales cumplir las funciones relacionadas con la ciencia y la tecnología de conformidad con las normas establecidas en el presente decreto* y en particular al Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA, corresponde: *Adelantar actividades de formación profesional de conformidad con las normas vigentes, dirigida a transferir tecnología de utilización inmediata en el sector productivo, realizar programas y proyectos de investigación aplicada y desarrollo tecnológico, y orientar la creatividad de los trabajadores colombianos* [14].

5. MÉTODO

Se establece una estrategia de investigación fundamentada en el fortalecimiento de capacidades para el desarrollo de procesos de investigación formativa, investigación aplicada y desarrollo experimental que se estructura en los siguientes componentes:

- Generación de espacios de aprendizaje que promuevan la sensibilización, formación y fortalecimiento de capacidades en investigación.
- Conformación de semilleros y grupos de investigación que a través de la formulación, ejecución y divulgación de proyectos alineados a las sub-líneas de investigación generen resultados que impacten a nivel formativo, científico y/o productivo (comprendiendo este último como la capacidad de generar productos aprovechables en el sector empresarial o para el escalamiento industrial)
- Actualización y modernización tecnológica de acuerdo a las necesidades del entorno y avances del sector productivo para desarrollar acciones formativas e investigativas.
- Articulación con el sector productivo para brindar soluciones a problemáticas que a través de los ejercicios de investigación aplicada, desarrollo experimental o investigación formativa responda a las necesidades identificadas.

De acuerdo con los componentes establecidos, se hace necesario resaltar la importancia de trabajar en alguno de los siguientes escenarios donde los aprendices e instructores protagonicen procesos de aprendizaje o investigación.

- Desde la investigación aplicada y desarrollo experimental los aprendices e instructores aplicarán conocimientos técnicos y metodológicos para la solución de problemáticas y satisfacción de necesidades del entorno.
- Desde la investigación formativa se llevará a cabo procesos de sensibilización y fortalecimiento de capacidades en temas afines al contexto del sector, bases conceptuales para desarrollar procesos de investigación.

5.1 Aspectos técnicos

5.1.1 Software utilizado en la metodología BIM

Para seleccionar el software a utilizar en la metodología BIM, es necesario identificar las características de acuerdo a la necesidad. Dentro de la metodología BIM se pueden encontrar diferentes áreas de trabajo y para cada una de ellas existen diferentes proveedores de software como se puede observar en la Figura 2.

- Software para diseño colaborativo de modelado BIM.
- Software para visualización de modelos colaborativos visores BIM.

- Software para planificación de obra a partir de modelos BIM.
- Software para plantificación de cantidades y establecimiento de presupuestos en modelos BIM.
- Software para la gestión ambiental y la eficiencia energética en modelos BIM.
- Software para la gestión administrativa y de actividades en modelos BIM.
- Software para el diseño de instalaciones técnicas en modelos BIM.
- Software para el diseño de estructuras en modelos BIM.



Figura 2. Galería de imágenes corporativas. Adaptada de imágenes obtenidas en portales corporativos

5.1.2 Modelado BIM

Un software para el modelado dinámico de proyectos de construcción en tiempo real, permiten reducir el tiempo y los recursos en la etapa de diseño. Parametriza características geométricas, relaciones espaciales, información geográfica. Agiliza el procedimiento para cuantificar cantidades y permite definir propiedades de los componentes constructivos. A continuación, se realiza la presentación general de dos programas disponibles para el modelado BIM.

- *ArchiCAD*. ArchiCAD fue un software utilizado en BIM y cuenta con modelos virtuales completos a partir de una base de datos con información constructiva. Tiene una biblioteca de objetos prediseñados que se pueden incorporar fácilmente al modelo. Es un software de diseño asistido por computadora que trabaja bajo el concepto de edificio virtual.
- *Autodesk Revit*. Revit Es un Software de diseño inteligente con objetos paramétricos prediseñados. Dispone de las herramientas necesarias para modelar diseños arquitectónicos, de ingeniería y de construcción. Todo se modela mediante objetos inteligentes obtenidos en 3D sobre la marcha.

5.1.3 Visores BIM

Un software utilizado para la visualización de modelos BIM puede ser ejecutado en diferentes formatos, de manera fácil y permite reducir costos, tiempo y procesos. A continuación, se realiza la presentación general de dos visualizadores BIM disponibles en el mercado.

- *BIM Collab Zoom*. Es un visualizador gratuito y compatible con diferentes herramientas informáticas. Permite intercambiar comentarios entre aplicaciones BIM, abre con facilidad, rapidez y permite el intercambio de información entre modelos sin pérdidas ni distorsión de datos.
- *BIMx* (Graphisoft). BIMx fue creado por Graphisoft en versiones móvil y de escritorio. Permite una visualización rápida en modelos 2D y 3D, es compatible con ArchiCAD y es de fácil manejo.

5.1.4 Planificación de obra o 4D

Un software para la planificación de obra en tiempo real, permite realizar simulaciones en diferentes escenarios para la toma de decisiones. A continuación, se realiza la presentación general de dos planificadores de obra BIM disponibles en el mercado.

- *Naviswork* (Autodesk). Naviswork permite abrir y combinar modelos, navegar por ellos en tiempo real. Se pueden realizar revisiones a partir de conjuntos de herramientas. Cuenta con complementos para la detección de interferencias, y simulación de tiempo 4D.
- *SYNCHRO*. Ofrece solución para visualizar, analizar, editar y rastrear con precisión todo un proyecto, incluyendo logística y trabajos temporales. Este entorno visual y rico en datos involucra a todos los miembros del equipo en un proceso transparente para optimizar proyectos de construcción.

5.1.5 Medición y presupuesto o 5D

Un software de esta categoría, permite realizar la medición y cuantificación de cantidades para establecer presupuestos estimados. A continuación, se realiza la presentación general del software para la cuantificación de cantidades y establecimiento de presupuestos en proyectos de construcción por medio de la metodología BIM disponibles en el mercado.

- *Arquimedes* (CYPE). Arquimedes se enlaza con REVIT y es un programa muy completo para el BIM 5D. Da opción a realizar mediciones, presupuestos, certificaciones, pliegos de condiciones, así como el manual de uso y mantenimiento de un edificio.
- *Presto Cost It*. Presto Cost It es un software que permite mejorar las condiciones completas del modelo, de forma estructurada y con trazabilidad, convertir las mediciones en el presupuesto necesario para valorar o licitar el proyecto y obtener toda la información relacionada, como las superficies útiles y construidas, los parámetros relevantes para determinar el precio o la documentación.

5.1.6 Gestión ambiental y eficiencia energética o 6D

Un software para la gestión ambiental permite estimar el uso eficiente de la energía. Un aparato, proceso o instalación es energéticamente eficiente cuando consume una cantidad inferior a la media de energía para realizar una actividad. Una persona, servicio o producto eficiente comprometido con el medio ambiente, además de necesitar menos energía para realizar el mismo trabajo, también busca abastecerse con la mayor cantidad posible de energías renovables (también llamadas energías alternativas). A continuación, se realiza la presentación general de dos gestores ambientales y de eficiencia energética BIM disponibles en el mercado.

- *EcoDesigner* (Graphisoft). El software EcoDesigner de Graphisoft permite al usuario realizar la evaluación del rendimiento energético del edificio con una tecnología que cumple las normativas, con el soporte de múltiples bloques térmicos. Como resultado, los diseñadores pueden hacer cálculos de energía de forma dinámica y precisa desde el principio, durante y hasta el final del proyecto.
- *Green Building Studio* (Autodesk). El software Green Building Studio de Autodesk tiene un servicio flexible con información actualizada en la nube que permite ejecutar simulaciones de rendimiento del edificio para optimizar la eficiencia energética al principio del proceso de diseño. Tiene herramientas para diseñar edificios de alto rendimiento en una fracción del tiempo y costo menor que los métodos convencionales.

5.1.7 Facility Management o 7D

Un software de facility Management permite realizar gestión del proceso constructivo con la metodología BIM desde los diseños previos y especificaciones técnicas hasta el fin del periodo de vida útil. A continuación, se realiza la presentación general de dos gestores ambientales y de eficiencia energética BIM disponibles en el mercado.

- *Maximo* (IBM). Desde el módulo Building Information Models del software de IBM Maximo, se puede realizar la integración de las diferentes áreas presentes en un proyecto de construcción bajo la metodología BIM y da la opción de tener un modelo único actualizado donde todos los intervinientes puedan mirar y conectar con Maximo para la fase de mantenimiento de sus activos.
- *ARCHIBUS*. Archibus es un software de gestión diseñado para simplificar el trabajo, al automatizar el flujo de información desde las fases de diseño y construcción de la propiedad hasta la gestión completa del ciclo de vida de los activos. Es uno de los más utilizados.

5.1.8 Diseño de instalaciones técnicas

Un software para el diseño de instalaciones técnicas a partir de la metodología BIM permite realizar la proyección de:

- Instalaciones hidráulicas
- Instalaciones sanitarias
- Redes para el suministro de gas
- Sistemas de redes contra incendios
- Instalaciones eléctricas

Por medio del trabajo colaborativo se previene la intersección entre redes de instalaciones técnicas y optimiza el proceso de materialización de la construcción. A continuación, se realiza la presentación general de dos programas para el diseño de instalaciones BIM disponibles en el mercado.

- *CYPECAD MEP*. Cypecad Mep es un software para el diseño y dimensionamiento de la envolvente, la distribución, y las instalaciones del edificio sobre un modelo BIM. Se estructura en diferentes solapas

interrelacionadas. Dependiendo del país seleccionado en la creación de una obra, realiza diferentes comprobaciones y dimensionamientos.

- *DDS CAD*. En DDS CAD el BIM MEP, es el programa más popular en el sector de las instalaciones. Contiene en su conjunto, herramientas de creación y análisis de las diferentes instalaciones como: aire acondicionado, electricidad o fontanería, de un edificio, siguiendo así los valores BIM. Este software, permite a los usuarios tomar las decisiones más adecuadas, para crear instalaciones de muy alta calidad y evitar costes innecesarios [15].

5.1.9 Diseño de estructuras

Un software para el diseño de estructuras permite realizar un diseño adecuado y balanceado entre las funciones propias de los materiales, a partir de las características naturales específicas, las capacidades mecánicas y el menor costo que puede conseguirse. El costo de la estructura siempre debe ser el menor, pero obteniendo el mejor resultado a partir de un análisis estructural previo. A continuación, se presentan dos alternativas de software para el diseño de estructuras disponibles en el mercado.

- *Tricalc*. El software Tricalc realiza diseños y cálculos de estructuras de acero, de hormigón y de cualquier material, incluso estructuras de hormigón con cerchas de acero, y naves de acero con forjados, losas, muros resistentes y muros de contención o pilotes; con una misma forma de trabajo y con todas sus prestaciones.
- *Tekla Structures*. El software de Tekla Structures es una solución 3D integrada basada en modelos para gestionar bases de datos de múltiples materiales (acero, hormigón, madera, etc.). Tekla presenta modelado interactivo, análisis estructural y diseño, y creación automática de dibujos.

5.2 Requerimientos del sistema

De acuerdo a la información encontrada en la página oficial de Autodesk, se pueden resumir los requerimientos mínimos del sistema en la Tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos mínimos de Autodesk Revit

Requisitos mínimos	Revit 2019	Revit 2020
Sistema operativo	Microsoft Windows 7 sp1 64 bit	Microsoft windows 10 64 bit (enterprise o pro)
	Microsoft Windows 8.1 64 bit	
	Microsoft windows 10 anniversary update 64 bit (version 1607 o posterior)	
Memoria libre	5 Gb	30 Gb
Memoria RAM	4 Gb	8 Gb o superior
Procesador	El de mayor velocidad posible	El de mayor velocidad posible

Los requisitos mínimos sugeridos por Autodesk permiten interpretar que el software Revit se adapta fácilmente con un equipo de características que no se salen de lo normal; sin embargo, estos requisitos mínimos pueden generar complicaciones para el desarrollo de proyectos bajo la metodología BIM. Por ello resulta conveniente conocer otros puntos de vista. De acuerdo a la información suministrada en el portal www.especialista3d.com se puede seleccionar el mejor ordenador conforme a las necesidades definidas en tres perfiles generales.

Perfil 1 para trabajos sencillos que no requieren programación ni renderizado:

- Procesador Intel core i7 64 bits.
- Sistema operativo Windows 10 pro de 64 bits.
- Memoria Ram de 16 Gb.
- Disco duro con capacidad de 256 Gb.
- Disco de arranque SSD

Perfil 2 para obtener imágenes profesionales y/o videos de modelos:

- Procesador Intel core i7 64 bits.
- Sistema operativo Windows 10 pro de 64 bits.
- Memoria Ram de 32 Gb.
- Disco duro con capacidad de 2 Tb.
- Tarjeta gráfica NVIDIA QUADRO M1200
- Disco de arranque SSD

Perfil 3 equipo ideal para trabajar con Revit:

- Procesador Intel core i9 15 G5 Base.
- Sistema operativo Windows 10 pro de 64 bits.
- Memoria Ram de 64 Gb.
- Disco duro con capacidad de 2 Tb.

- Tarjeta gráfica NVIDIA QUADRO M1200
- Disco de arranque SSD

6. RESULTADOS

Conforme a la investigación realizada se obtuvieron los siguientes resultados:

- Para el cálculo de cantidades de obra y establecimiento de presupuestos se obtiene un rendimiento superior del orden del 33% en la metodología BIM con respecto a las metodologías tradicionales 2D.
- Para seleccionar el software a utilizar es necesario identificar el área de trabajo respectiva, pues dentro de la metodología BIM se manejan hasta 7 dimensiones en el momento de ejecutar un proyecto de construcción.
- En el momento de seleccionar el ordenador a utilizar es necesario establecer un balance entre las necesidades a satisfacer y la disponibilidad presupuestal.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir del análisis de resultados, se pueden establecer tres metas que permitirán materializar la propuesta e implementación de Building Information Modeling (BIM Room) en el Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera:

- Implementación de un aula modernizada y dotada de ordenadores workstation (Perfil 3 ideal para el trabajo con Autodesk Revit), 1 computador portátil ultra liviano, un monitor industrial general, monitores touch para facilitar el trabajo colaborativo al interior del BIM Room.
- Definir un caso de estudio de implementación de BIM en diferentes tipos de proyectos constructivos.
- Realizar la divulgación de los resultados obtenidos en el caso de estudio por medio de un artículo de investigación.

8. CONCLUSIONES

- La implementación de la metodología BIM es fundamental y estratégica para el crecimiento y desarrollo del sector de la construcción, y por ende es necesario que las nuevas generaciones en formación adquieran conocimientos y destrezas en el manejo de software especializado de Building Information Modeling.
- Para materializar la propuesta de implementación de Building Information Modeling (BIM Room) en el Centro de Tecnología para la Construcción y la Madera, se requiere la adquisición de ordenadores Workstation que permitan realizar proyectos constructivos de forma colaborativa partiendo desde los diseños y estudios previos, hasta la disposición final de residuos al finalizar el periodo de vida útil.

REFERENCIAS

- [1] Congreso de la República de Colombia. (1994). Ley 119. Capítulo I (1).
- [2] SENA, SENNOVA. (2020). Propósito. Recuperado: <https://www.sena.edu.co/es-co/formacion/Paginas/tecnologia-innovacion.aspx>.
- [3] Ramírez, J. (2018). Comparación entre metodologías Building Information Modeling (BIM) y metodologías tradicionales en el cálculo de cantidades de obra y elaboración de presupuestos. Caso de estudio: Edificación educativa en Colombia.
- [4] Choclan, F., Soler, M. y González, R. (2014). Introducción a la metodología BIM. Spanish Journal of Building Information Modeling, 14, 4-10.
- [5] Ingeniería Asistida por Computador. (2020). Home. ¿Qué es BIM? Recuperado: <https://www.iac.com.co>.
- [6] SENA. (2018). Experto arquitecto en metodología BIM llega al SENA. Recuperado: <https://www.sena.edu.co/es-co/Noticias/Lists/Noticias/DispForm.aspx?ID=3576&ContentTypeId=0x0104005122A34C2D09634CA58B2C72F77164710071E5D578ED7D464F92965F8BEBEA07315>.
- [7] Salazar, M. (2017). Impacto económico del uso de BIM en el desarrollo de proyectos de construcción en la ciudad de Manizales. Origen del BIM.
- [8] Grajales, T. (2000). El Origen de una investigación. Omega.
- [9] Gabriel, J. (2017). Cómo se genera una investigación científica que luego sea motivo de publicación. Journal of the Selva Andina, 1, 18-27.
- [10] Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria. Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamericana 3(1), 47-50.
- [11] Restrepo, B. (2004). Formación investigativa e investigación formativa: Aceptaciones y operaciones de esta última. Ruteo.
- [12] Montoya, J. y Peláez, L. (2013). Investigación formativa e investigación en sentido estricto: Una reflexión para diferenciar su aplicación en instituciones de educación superior. Entre Ciencias e Ingeniería, 13, 20-25.

- [13] Fundación Española Ciencia y Tecnología. (2002). Manual de Frascati. Propuesta de norma práctica para encuestas de investigación y desarrollo experimental. 2.1. Investigación y desarrollo experimental.
- [14] Ministerio de Gobierno de la República de Colombia. (1991). Decreto 585. Título III.
- [15] Gestor Energético. (2018). ¿Qué es BIM MEP? Gestión de proyectos de instalaciones. Recuperado: <https://www.gestor-energetico.com/bim-mep/>.

Ingeniería del software y desarrollo sostenible: Un análisis bibliométrico

Luisa María Jiménez Ramos¹

Nixon Duarte Acosta¹

Juan Pablo Vélez Uribe¹

Juan Pablo Berrio López²

¹Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano

²Corporación Universitaria Remington
Colombia

El desarrollo sostenible se ha convertido en una tendencia del milenio. Los titulares de las noticias y los informes científicos enfatizan en el cambio climático y las graves consecuencias de éste. Se deben tomar medidas serias para evitar golpear el *punto de no retorno*, que es cuando ninguna cantidad de recortes en la contaminación nos salvará de las repercusiones potencialmente catastróficas del calentamiento global. Hoy en día, el software es generalizado en nuestra vida cotidiana. Su sostenibilidad y su impacto ambiental, también se han convertido en factores importantes a considerar en el desarrollo de software. Por lo tanto, es fundamental que los investigadores interesados en este tema comprendan el estatus de los estudios realizados en todo el mundo y tengan una visión general del mismo. Por tal motivo, se hizo un análisis bibliométrico de la base de datos Scopus para el periodo de 2000 a 2019, centrándose en temas como: software verde, software y desarrollo ambiental, software y desarrollo sostenible, software y sostenibilidad. Esto produjo un resultado inicial de 137.637 documentos; seguidamente, se filtró por el área temática de Ciencias Computacionales, obteniendo 72.181 documentos, posteriormente por las palabras claves: medio ambiente y sostenibilidad, para un resultado de 594 documentos, que resultaron en 67 publicaciones que correspondían a las más citadas y que coincidían en su contenido con la palabra clave software combinada con otras como sostenibilidad, desarrollo sostenible, medio ambiente y verde. El análisis se realizó utilizando la herramienta de análisis de resultados de búsqueda de Scopus y VOSviewer. Los hallazgos bibliométricos indican que EE.UU., Reino Unido y Alemania son los países más interesados en el área y de Latinoamérica el único país que aparece en el top 10 es Brasil. Las temáticas en investigación más representativas, y directamente relacionadas con software en las 67 publicaciones más citadas, involucran temas de ingeniería del software (16%), arquitectura de software (7%), sistemas software (13%), ingeniería de requisitos (28%), software de computador (21%) y diseño de software (15%). No se evidenciaron publicaciones en el área relacionadas con desarrollo o construcción, pruebas, despliegue, mantenimiento o evolución de software. Los resultados de este trabajo pueden ser útiles para las instituciones e investigadores interesados en las posibles lagunas de investigación que deseen centrar futuras investigaciones, inversiones o estudios de campo en el área de la ingeniería del software y el desarrollo sostenible.

1. INTRODUCCIÓN

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que incluye 17 Objetivos y 169 metas, presenta una visión ambiciosa del desarrollo sostenible e integra sus dimensiones económica, social y ambiental. Esta nueva Agenda es la expresión de los deseos, aspiraciones y prioridades de la comunidad internacional para los próximos 15 años. La Agenda es una agenda transformadora que pone a la igualdad y la dignidad de las personas en el centro y llama a cambiar nuestro estilo de desarrollo, respetando el medio ambiente. Es un compromiso universal adquirido tanto por países desarrollados como en desarrollo, en el marco de una alianza mundial reforzada, que toma en cuenta los medios de implementación para motivar el cambio y la prevención de desastres por eventos naturales extremos, así como la mitigación y adaptación al cambio climático.

El objetivo 4 de desarrollo sostenible en educación de calidad establece: *Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos* y como una meta de este objetivo, ordena que *“De aquí al 2030, asegurar que todos los alumnos adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible, entre otras cosas mediante la educación para el desarrollo sostenible y los estilos de vida sostenibles, los derechos humanos, la igualdad de género, la promoción de una cultura de paz y no violencia, la ciudadanía mundial y la valoración de la diversidad cultural y la contribución de la cultura al desarrollo sostenible*. Para lo cual instaura como indicadores de este objetivo el grado en el que se incorporan, en todos los niveles de las políticas nacionales de educación, la educación para el desarrollo sostenible en los planes de estudio, la formación del profesorado y la evaluación de los estudiantes [1].

En este contexto, la educación en todos los niveles se ha destacado como clave para lograr esfuerzos a largo plazo en el diseño de un futuro sostenible. La nueva generación de estudiantes universitarios, están particularmente interesados en aprender y contribuir a una sociedad más sostenible y verde. Sin embargo, una encuesta de 3860 profesionales de ingeniería del software que trabajan en IBM, Google, ABB y Microsoft, mostró que el plan de estudios de educación superior no los prepara para abordar la sostenibilidad, aunque estos profesionales estaban dispuestos a aprender sobre la sostenibilidad [2]. El propósito de esta investigación es comprender, desde una perspectiva de revisión bibliométrica en la literatura científica, el estado del arte de la ingeniería del software en el contexto del desarrollo sostenible.

Como se trata de un estudio preliminar, pero también sin precedentes, esperamos que los resultados y conclusiones de este trabajo de investigación motiven futuros estudios exploratorios y prácticos en el campo de la ingeniería del

software y el desarrollo sostenible. Los principales hallazgos indican que las publicaciones relacionadas con el área de estudio muestran una tendencia en aumento en los últimos 20 años, que el mayor volumen de producción se encuentra en las publicaciones de artículos en conferencias, los tres países con mayor producción son EE.UU., Reino Unido y Alemania, las áreas específicas de la ingeniería del software con investigaciones relacionadas en el desarrollo sostenible son la Ingeniería de requisitos, Diseño de software y Arquitectura de software. Además, se identifican áreas para explorar y/o fortalecer, como la construcción de software, la calidad de software, el mantenimiento y la evolución del software. Este documento se encuentra organizado en tres secciones comenzando con el Método utilizado en el análisis bibliométrico, seguido de una sección de Resultados, que incluyen indicadores bibliométricos como la evolución de las publicaciones por año, la producción por tipo de publicación, producción por autor, publicaciones por país, las instituciones más productivas y las 50 publicaciones más citadas. La última sección contiene las conclusiones del estudio.

2. ANTECEDENTES

El lento crecimiento económico mundial, las desigualdades sociales y la degradación ambiental que son característicos de nuestra realidad actual presentan desafíos sin precedentes para la comunidad internacional. En efecto, estamos frente a un cambio de época: la opción de continuar con los mismos patrones de producción, energía y consumo ya no es viable, lo que hace necesario transformar el paradigma de desarrollo dominante en uno que nos lleve por la vía del desarrollo sostenible, inclusivo y con visión de largo plazo.

En [3] definen la computación verde como uno de los esfuerzos positivos para mantener la sostenibilidad ambiental y que esta se puede realizar mediante la eficiencia energética de los dispositivos TIC, la eficiencia del papel y la reducción de los desechos electrónicos. A través, de su investigación establece una política a través de un modelo de adopción de la computación verde. En el modelo propuesto existen tres cosas que juegan un papel de éxito en la adopción de la computación verde en la educación superior en Indonesia: la regulación gubernamental, el estilo de gestión del campus universitario y las herramientas de soporte tanto de hardware como de software.

De acuerdo con [4], la intención de establecer la llamada Universidad Verde se persigue en varios países del mundo, por lo que intentan construir, a través de su trabajo, un modelo de educación para programas de computación para el desarrollo sostenible, que permita que otras instituciones educativas adopten prácticas que ayuden a graduar estudiantes conscientes del medio ambiente desde las disciplinas de la computación. Y desde su trabajo examinan como los programas informáticos pueden ayudar a responder las siguientes preguntas con respecto a un programa ecológico: ¿Cómo minimizar el impacto negativo de las prácticas y tecnologías de la disciplina en el medio ambiente?, ¿Cómo aportar los recursos y técnicas de la disciplina para aumentar la sostenibilidad ambiental? y ¿Cómo incorporar ambos principios antes mencionados en el currículo de la disciplina?

En [5] tienen como objetivo dar una idea de la importancia del curso de TIC verdes en el plan de estudios de maestría y doctorado, demostrando su necesidad, problemas de implementación y planes estratégicos de ejecución. El objetivo del curso es proporcionar una visión unificada de las tecnologías de sistemas integrados sostenibles, prácticas de uso eficiente de computadoras y equipos de telecomunicación, estrategias de evaluación ambiental y gestión del ciclo de vida de componentes electrónicos y productos finales. Además, impartir conocimientos sobre el enfoque de diseño sostenible en el ciclo de vida de los materiales, procesos de fabricación, uso, reutilización y reciclaje de los equipos y componentes electrónicos.

3. MÉTODO

Se inició con la identificación de publicaciones de una base de datos robusta y confiable como Scopus, ya que esta se considera como una de las bases de datos bibliográfica más grandes de literatura revisada por pares, que incluye revistas científicas, libros y publicaciones de conferencias. El alcance en las publicaciones se definió para un intervalo de tiempo de 20 años (2000 - 2019).

Las palabras claves que se tomaron como base para la definición de la ecuación de búsqueda fueron: *environment, sustainable, sustainability, Green* y *software*. La ecuación de búsqueda inicial fue: TITLE-ABS-KEY ((environment OR sustainab* OR green) AND software) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2010) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2009) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2008) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2007) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2006) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2004) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2003) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2002) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2001) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2000)). La ejecución inicial de esta ecuación recuperó 137.637 documentos.

Posteriormente, se filtraron únicamente los documentos en el área temática, específicamente en Ciencias Computacionales, obteniendo como resultado 72.181 documentos. Seguidamente, se filtró por las siguientes palabras

claves que estaban disponibles en el resultado y que estuviesen directamente relacionadas con el objeto de estudio: Sustainability, Environment y Green. Como resultado se obtuvieron 593 documentos. Finalmente, la ecuación de búsqueda quedó de la siguiente forma: TITLE-ABS-KEY ((environment OR sustainab* OR green) AND software) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2010) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2009) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2008) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2007) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2006) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2004) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2003) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2002) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2001) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2000)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Sustainability") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Environment")).

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los ocho indicadores bibliométricos que hacen parte de este estudio. Para cada uno de los indicadores, se presenta una gráfica, descripción y respectivo análisis parcial. Se inicia con la presentación de la evolución del número de publicaciones por año, continuando con documentos publicados por tipo de producción, documentos publicados por sub-área de conocimiento, producción por autor, publicaciones de los 10 países más productivos, las 10 instituciones más productivas, las 50 publicaciones más citadas y para finalizar, se presenta el mapa de coocurrencia de palabras claves.

4.1 Evolución del número de publicaciones por año

La producción de documentos relacionados con *Software y sostenibilidad* muestra una tendencia en aumento en el periodo de 20 años (2000-2019), como se observa en la Figura 1. En la primera década (2000-2009), paso de tener 4 documentos a 14 documentos publicados, representando un incremento del 350%. En la segunda década de estudio (2010-2019), la producción aumento de 14 documentos a 54 documentos publicados, representando así un incremento del 386%. En general, el periodo de estudio, de 20 años, presenta una media de 29.7 estudios científicos y una desviación estándar de 20.6, evidenciando que el tema de estudio, *software y sostenibilidad*, no se encuentra en disminución, si no por el contrario está tomando cada vez más fuerza y tiene una tendencia a incrementar.

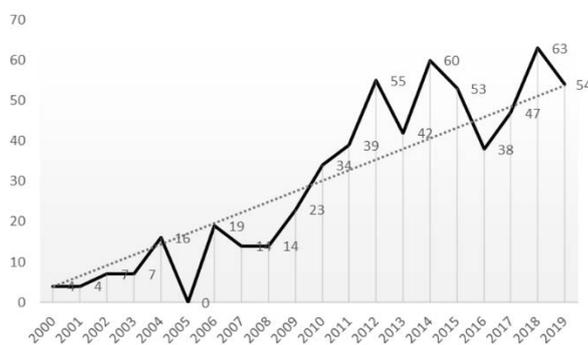


Figura 1. Publicaciones por año

4.2 Documentos publicados por tipo de producción

En la Figura 2 se puede observar que el mayor volumen de publicaciones, se encuentra en las publicaciones tipo artículos de conferencias, con un volumen de 363 lo que representa el 61.2%. En segundo lugar, se encuentran los artículos publicados en revistas, con un volumen de 204 representando un 34.4%. En tercer lugar, se encuentran los artículos de revisión, con un volumen de 12 representando el 2%. En cuarto lugar, se observan los capítulos de libros con un volumen de 11 representando el 1.9% y por último publicaciones del tipo editorial con un 0.5%.

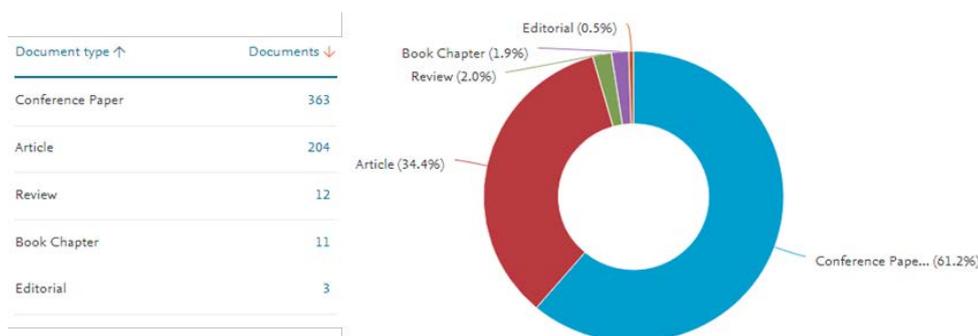


Figura 2. Tipo de producción

4.3 Documentos publicados por sub-área de conocimiento

En la Figura 3 se presenta como área principal el área de Ciencias Computacionales, puesto que, en la ecuación de búsqueda, se configuro como un filtro principal, con el objeto de solo obtener documentos relacionados con el área. Dentro de las sub-áreas, se encuentra Otros con un 37.8% que hace referencia a subáreas como Ingeniería, Matemáticas, Ciencias ambientales y Medicina entre los más representativos del grupo. Posteriormente se encuentra en segundo lugar Ciencias de decisiones con un 3.6%, Bioquímica, genética y biología molecular con un 2.5% y Ciencias agrícolas y biológicas con una representación del 1.6%.

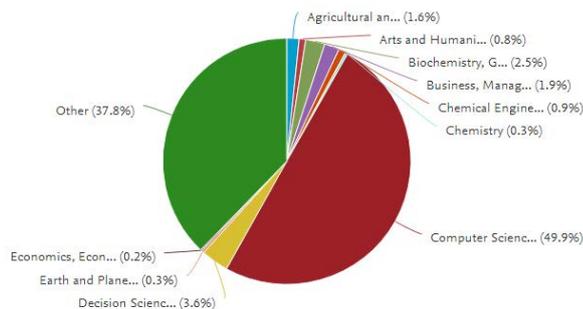


Figura 3. Sub-áreas de conocimiento

4.4 Producción por autor

Como se observa en la Figura 4, el autor Penzenstadler Birgit aparece en el primer lugar con 29 documentos, de los cuales, solo en 13 documentos aparece como primer autor. El autor Chitchyan Ruzanna aparece en el segundo lugar con 13 documentos, de los cuales, solo en 4 de ellos aparece como primer autor. En tercer lugar, aparece Duboc Letícia con 12 documentos de los cuales, en solo 1 aparece como primer autor. En el cuarto lugar aparecen tres autores, cada uno con 11 documentos: Betz Stefanie con 3 documentos como primer autor, Lago Patricia con 5 documentos como primer autor y Venters Colin C. con 2 documentos como primer autor. En quinto lugar, se encuentra Quintal Filipe con 10 documentos, de los cuales, en 8 aparece como primer autor. Y en la sexta posición se encuentran 3 autores con 8 documentos: Pereira Lucas con 2 documentos como primer autor, Tomlinson Bill con 1 documento como primer autor y Seyff Norbert con 0 documentos como primer autor.

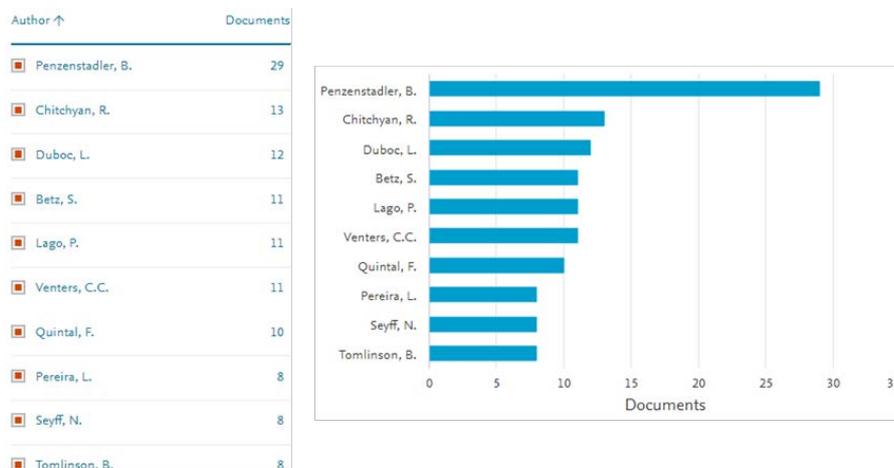


Figura 4. Producción por autor

De acuerdo con el análisis anterior, las posiciones de autores con mayor producción, en los documentos donde aparecen como primer autor quedaría de la forma como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Autores más productivos

Posición	Autor	Docs.
1	Penzenstadler Birgit	13
2	Quintal Filipe	8
3	Lago Patricia	5
4	Chitchyan Ruzanna	4
5	Betz Stefanie	3
6	Venters Colin	2
7	Pereira Lucas	2
8	Duboc Letíci	1
9	Tomlinson Bill	1
10	Seyff Norbert	0

4.5 Publicaciones de los 10 países más productivos entre 2000 - 2019

En la Figura 5 se muestra los 10 principales países clasificados por el número de documentos publicados. En el primer lugar se encuentra Estados Unidos con una producción de 144 documentos, Reino Unido con 65 documentos, Alemania con 58 documentos, España con 51 documentos, Italia con 47, Canadá con 37, Brasil con 32, China con 30, Países Bajos y Portugal con 28 documentos publicados. De los 70 países con producción científica en el área de “Software y Sostenibilidad”, únicamente 5 países latinoamericanos aparecen con producción: Brasil con 32 documentos correspondiente al 4% de la producción, Colombia con 5 documentos representando el 1% de la producción y Paraguay, México y Venezuela con menos del 1%.

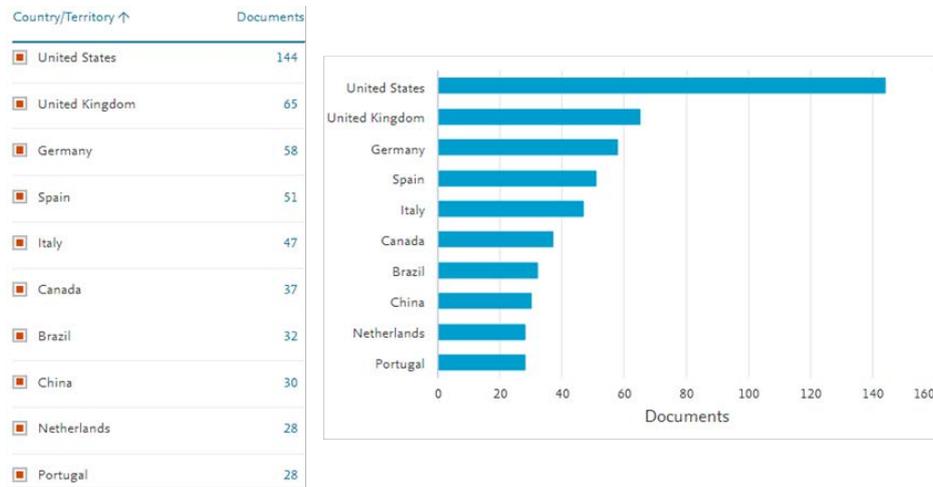


Figura 5. Top 10 de países más productivos

4.6 Las 10 instituciones más productivas entre 2000 - 2019

La Figura 6 aparecen las 10 principales instituciones clasificadas por el número de documentos publicados. Pertenecientes a Estados Unidos se encuentran California State University Long Beach y University of California Irvine en primer y segundo lugar con 16 y 15 documentos respectivamente. Vrije Universiteit Amsterdam de países bajos y University of Huddersfield de Reino Unido se encuentra en tercer lugar con 11 documentos. Universidad Rey Juan Carlos de España se encuentra en el cuarto lugar con 10 documentos. La Universidade de Sao Paulo de Brasil, University of Leicester de Reino Unido y Madeira Interactive Technologies Institute de Portugal se encuentran en el quinto lugar con 9 documentos. Universidade do Estado do Rio de Janeiro de Brasil y Lappeenrantaan Teknillinen Yliopisto de Finlandia. Como se puede observar, en el top 10 solo aparecen dos universidades de Latino América con publicaciones, pertenecientes a un solo país, Brasil.

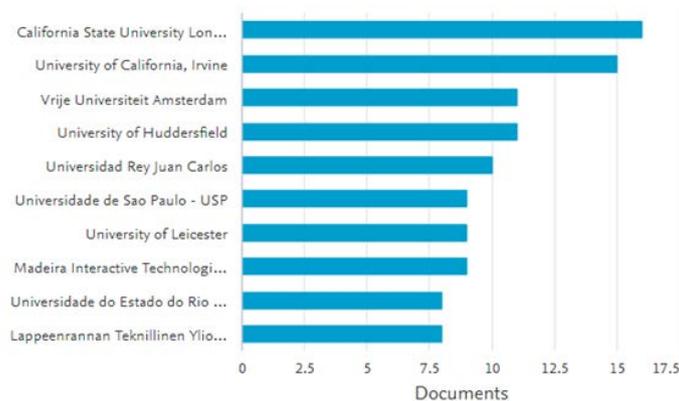


Figura 6. Top 10 de las instituciones más productivas

4.7 Las 50 publicaciones más citadas entre 2000 - 2019

En la Tabla 2 se presenta las 50 publicaciones más citadas y que hacen referencia a los temas de Software, Sostenibilidad y Software verde. Entre las publicaciones más citadas se encuentra [6], publicada en el 2011 con 125 citas a la fecha, este artículo presenta el uso de software utilizado en un problema de decisión real con respecto a la elección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, esta es una publicación relacionada con el uso de software, mas no con el proceso de ingeniería del software. No obstante, artículos como [7-10] entre otros, abordan temas en sus investigaciones directamente relacionadas con la ingeniería del software y el desarrollo sostenible.

Tabla 2. Publicaciones más citadas

Titulo		Año	Citas
Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems	[6]	2011	125
System dynamics model of urban transportation system and its application	[11]	2008	87
A generic model for sustainability with process- and product-specific instances	[12]	2013	83
Sustainability Design and Software: The Karlskrona Manifesto	[7]	2015	81
Sustainability evaluation of software architectures: A systematic review	[8]	2011	64
Safety, security, now sustainability: The nonfunctional requirement for the 21st century	[13]	2014	60
Bioprocesses: Modeling needs for process evaluation and sustainability assessment	[14]	2010	59
An empirical study of the impact of lean construction techniques on sustainable construction in the UK	[15]	2014	58
System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain	[16]	2015	54
Sustainability of free/Libre open source projects: A longitudinal study	[17]	2010	43
The past, present and future of CFD for agro-environmental applications	[18]	2013	42
Toward sustainable software engineering (NIER track)	[10]	2011	41
Systematic mapping Study on Software Engineering for Sustainability (SE4S)	[19]	2014	40
Sustainability design in requirements engineering: State of practice	[20]	2016	39
BIM extension for the sustainability appraisal of conceptual steel design	[21]	2015	36
Ontology-based system for supporting manufacturing sustainability	[22]	2012	36
Green tracker: A tool for estimating the energy consumption of software	[23]	2010	36
Real time power consumption monitoring for energy efficiency analysis in micro EDM milling	[24]	2015	31
A simple and effective digital imaging approach for tuna fish length measurement compatible with fishing operations	[25]	2011	30
Sustainable architectural design decisions	[26]	2013	28
Development of a web-based multi-criteria spatial decision support system for the assessment of environmental sustainability of dairy farms	[27]	2014	27
Sustainability requirement patterns	[28]	2013	27
Measuring the sustainability performance of software projects	[29]	2010	27
Better software, better research	[30]	2014	25
Who is the advocate? Stakeholders for sustainability	[31]	2013	24
A manifesto for future generation cloud computing: Research directions for the next decade	[32]	2019	23
Characterizing the contribution of quality requirements to software sustainability	[33]	2018	22
Developing a sustainability non-functional requirements framework	[34]	2014	22
Characterising sustainability requirements: A new species red herring or just an odd fish?	[35]	2017	21
MEnSuS: An efficient scheme for energy management with sustainability of cloud data centers in edge-cloud environment	[36]	2018	20
Synthesis of green IS frameworks for achieving strong environmental sustainability in organisations	[37]	2012	20
A roadmap towards sustainable self-aware service systems	[38]	2010	20
Flood forecasting in transboundary catchments using the Open Modeling Interface	[39]	2010	19
Understanding green software development: A conceptual framework	[40]	2015	17
Creating environmental awareness in service oriented software engineering	[41]	2011	17
Overcoming technical constraints for obtaining sustainable development with open source appropriate technology	[42]	2009	17
SustData: A public dataset for ICT4S electric energy research	[43]	2014	16
Software sustainability: The modern tower of babel	[44]	2014	15
Decision support for local environmental impact assessment	[45]	2007	15
Multicriteria decision analysis for sustainable data centers location	[46]	2013	14
Measuring software sustainability from a process-centric perspective	[47]	2012	14
Relating architectural decay and sustainability of software systems	[48]	2016	13
ICT4S 2029: What will be the systems supporting sustainability in 15 years?	[49]	2014	12
Towards a generic sustainable software model	[50]	2014	12
Challenges and Opportunities for Sustainable Software	[51]	2015	11
Enabling the Definition and Enforcement of Governance Rules in Open Source Systems	[52]	2015	10
Managing disruptive and sustaining innovations in green IT	[53]	2012	10
Quantifying Potential of Hybrid PV/WT Power Supplies for Off-Grid LTE Base Station	[54]	2018	9
Software Engineering for Sustainability: Find the Leverage Points!	[55]	2018	9
What Concerns Game Developers? A Study on Game Development Processes, Sustainability and Metrics	[56]	2017	9

4.8 Mapa de coocurrencia de palabras claves

A partir de la revisión de los 65 artículos más citados de Scopus en el área de la ingeniería del software en el contexto del desarrollo sostenible, publicados entre 2000 y 2019, se construyó el mapa de coocurrencia con las principales temáticas que marcan tendencia en las investigaciones basadas en datos de coocurrencia Figura 7. De esta manera, se forma un mapa, donde se tiene como base la distancia de separación entre las palabras claves, reflejando la fuerza de la relación entre ellas, donde a menor distancia indica un vínculo más fuerte. Esto facilita la identificación de grupos y clústeres de elementos relacionados.

A partir del análisis de coocurrencia se identifican cuatro clústeres que corresponden a las palabras claves más destacadas. Estos clústeres nos permiten reconocer que las investigaciones en ingeniería del software se enfocan en su relación con el desarrollo sostenible. En cuanto a la forma en que se distribuyen para efectos investigativos, se destaca la ingeniería del software en general, pero ésta a su vez se relaciona con áreas específicas como la arquitectura de software, el diseño de software y requisitos de software. La palabra clave más representativa para cada uno de los cuatro clústeres identificados son: Sostenibilidad y Desarrollo sostenible (Rojo), Ingeniería del software (Verde), Requisitos de software (Azul) y Software de computador (Amarillo).

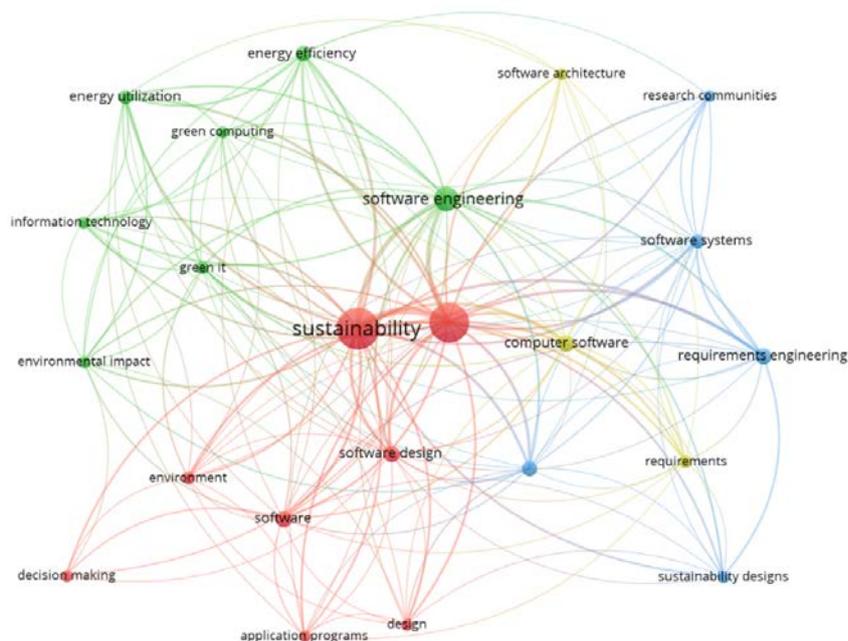


Figura 7. Mapa científico con las palabras claves definidas en la ecuación de búsqueda

En cuanto a la Ingeniería del software enfocada en el desarrollo sostenible (Figura 8) y según las publicaciones revisadas, se pudo establecer que, para temas directamente relacionados con la ingeniería del software (clúster 2), esta gira alrededor de la ingeniería de requisitos (clúster 3), el diseño de software (clúster 1) y la arquitectura de software (clúster 4).

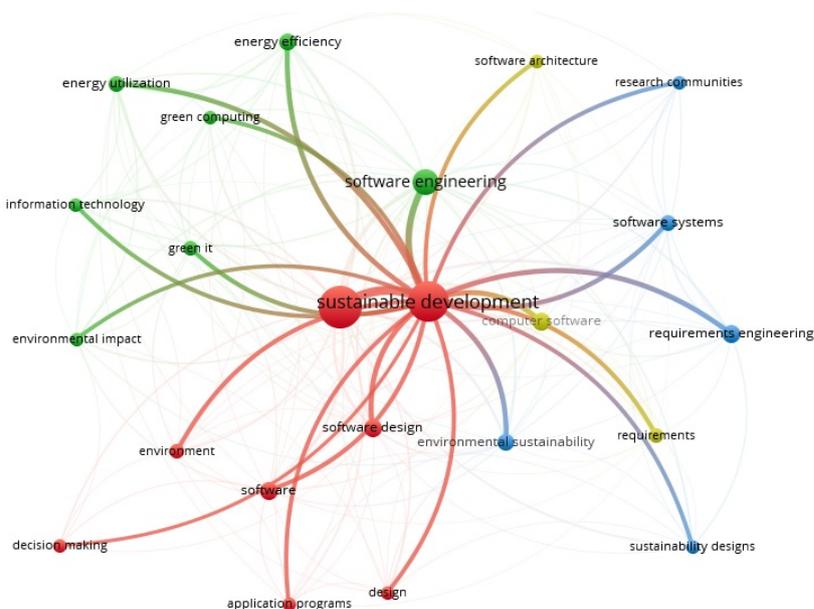


Figura 8. Desarrollo sostenible e Ingeniería del software

La Figura 8 es derivada de la Figura 7, pero la diferencia entre las dos figuras, radica en su objetivo o finalidad. Con la Figura 7, se pretende mostrar todas las relaciones entre las palabras claves en el área de tecnología, sostenibilidad y desarrollo sostenible, en consecuencia, aparecen palabras como *green it*, *information technology*, *green computing*, *application programs*, *software*, *software design*, *computing software*, *software system*, *software engineering*, *software architecture* y *requirements engineering*. Y adicionalmente, se muestran palabras claves estrechamente relacionadas con desarrollo sostenible, como es el caso de *environmental impact*, *energy efficiency*, entre otras. Con esta información se obtiene los temas de investigación que son tendencia e involucran a su vez la tecnología en sus diferentes ámbitos y el desarrollo sostenible con sus diferentes ejes, como pueden ser la eficiencia energética, el impacto ambiental, entre otros. De otro lado, con la Figura 8 se busca mostrar únicamente las relaciones directas con las palabras claves como sostenibilidad y desarrollo sostenible, a partir de dicha figura, identificamos fácilmente los temas específicos del área de ingeniería del software, que son el interés de este trabajo y que son tendencia en investigación. Temas definidos por las palabras claves alrededor de la ingeniería del software, como la arquitectura de software, ingeniería de requisitos y diseño de software, principalmente.

5. CONCLUSIONES

En este documento, presentamos un primer mapeo sistemático de los documentos en el área de ingeniería del software y desarrollo sostenible, publicado entre 2000 y 2019. Nuestra búsqueda, resultado de la ejecución de la ecuación de búsqueda final, recuperó 593 documentos que fueron incluidos en este estudio utilizando una estrategia de selección. Derivamos gradualmente un esquema de clasificación analizando los documentos. Además, presentamos un primer análisis bibliométrico del dominio para comprender la tendencia de publicación por año, documentos publicados por tipo de producción, publicaciones por sub-área de conocimiento, autores activos y más productivos, volumen de producción por país, instituciones más productivas, los documentos más citados en el área de investigación y un mapa de coocurrencia de palabras claves.

De acuerdo con los indicadores obtenidos, se evidencia que el mayor volumen de publicaciones se realiza en artículos de conferencias, seguido por publicaciones de artículos en revistas. La producción investigativa en el área está incrementando y las sub-áreas, entre los 593 documentos, con mayor investigación relacionada son: Ingeniería, Matemáticas, Ciencias ambientales y Medicina. Pero, para las 50 publicaciones más citadas específicamente en áreas de la ingeniería del software con el desarrollo sostenible, las tendencias de investigación están relacionadas con la ingeniería de requisitos, el diseño de software y la arquitectura de software.

El análisis bibliométrico basado en un mapa de coocurrencia de palabras claves, permite encontrar conexiones de temáticas propias de la ingeniería del software, con otras sub-áreas como la ingeniería de requisitos, el diseño de software y la arquitectura de software. De este modo, se pretende que los resultados del presente trabajo de investigación, pueda orientar a equipos investigativos sobre las tendencias actuales de investigación mundial, relacionadas con la ingeniería del software y el desarrollo sostenible y así poder hacer aportes en las áreas de mayor desarrollo, como también en las de menor producción.

En el top 10 de los autores más productivos no se encuentra un latinoamericano como primer autor. En el top 10 de los países más productivos solo se encuentra Brasil de Latinoamérica con 32 publicaciones frente a los tres primeros lugares ocupados por Estados Unidos con 144, Reino Unido con 65 y Alemania con 58 publicaciones. Lo que representa un reto y oportunidad para los investigadores e instituciones de la región.

Algunos de los resultados analizados en este análisis bibliométrico presentan tendencias orientadas desde la ingeniería del software, el desarrollo sostenible, la ingeniería de requisitos, el diseño de software y la arquitectura de software, hacia la eficiencia energética, la computación y tecnologías de la información verde, el impacto ambiental, la utilización de la energía y diseños de sostenibilidad.

REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas. (2018). Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe. Recuperado: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf.
- [2] Torre, D. et al. (2017). On the presence of green and sustainable software engineering in higher education curricula. En IEEE/ACM 1st International Workshop on Software Engineering Curricula for Millennials. Buenos Aires, Argentina.
- [3] Hanief, S. et al. (2019). A proposed model of green computing adoption in Indonesian higher education. En 6th International Conference on Cyber and IT Service Management. Parapat, Indonesia.
- [4] Zalewski, J. y Sybramanian, N. (2015). Developing a green computer science program. En Seventh Annual IEEE Green Technologies Conference. Oklahoma, USA.
- [5] Kanth, R. et al. (2012). Exploring course development for green ICT in engineering education: A preliminary study. En IEEE International Conference on Engineering Education: Innovative Practices and Future Trends. Kottayam, India.
- [6] Bottero, M., Comino, E. y Riggio, V. (2011). Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environmental Modelling & Software*, 26(10), 1211-1224.
- [7] Becker, C. et al. (2015). Sustainability design and software: The Karlskrona Manifesto. En 37th IEEE International Conference on Software Engineering. Florence, Italy.
- [8] Koziolk, H. (2011). Sustainability evaluation of software architectures: A systematic review. En ACM SIGSOFT conference-QoS and ACM SIGSOFT symposium. Boulder, USA.
- [9] Penzenstadler, B., Raturi, A. y Richardson, D. (2014). Safety, security, now sustainability: The Nonfunctional requirement for the 21st century. *IEEE software*, 31(3), 40-47.
- [10] Amsel, N. et al. (2011). Toward sustainable software engineering (NIER track). En 33rd international conference on software engineering. Waikiki, USA.
- [11] Wang, J., Lu, H. y Peng, H. (2008). System dynamics model of urban transportation system and its application. *Journal of Transportation Systems engineering and information technology*, 8(3), 83-89.
- [12] Penzenstadler, B. y Femmer, H. (2013). A generic model for sustainability with process- and product-specific instances. En 2013 workshop on Green in/by software engineering. Fukuoka, Japan.
- [13] Penzenstadler, B. et al. (2014). Safety, security, now sustainability: The nonfunctional requirement for the 21st century. *IEEE software*, 31(3), 40-47.
- [14] Jiménez, C. y Woodley, J. (2010). Bioprocesses: Modeling needs for process evaluation and sustainability assessment. *Computers & Chemical Engineering*, 34(7), 1009-1017.
- [15] Ogunbiyi, O., Oladapo, A. y Goulding, J. (2014). An empirical study of the impact of lean construction techniques on sustainable construction in the UK. *Construction innovation*.

- [16] Golroudbary, S. y Zahraee, S. (2015). System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 53, 88-102.
- [17] Chengalur-, I., Sidorova, A. y Daniel, S. (2010). Sustainability of free/Libre open source projects: A longitudinal study. *Journal of the Association for Information Systems*, 11(11), 5-16.
- [18] Lee, I. et al. (2013). The past, present and future of CFD for agro-environmental applications. *Computers and electronics in agriculture*, 93, 168-183.
- [19] Penzenstadler, B. et al. (2014). Systematic mapping Study on Software Engineering for Sustainability (SE4S). En 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering. London, UK.
- [20] Chitchyan, R. et al. (2016). Sustainability design in requirements engineering: State of practice. En 38th International Conference on Software Engineering Companion. Austin, USA.
- [21] Oti, A. y Tizani, W. (2015). BIM extension for the sustainability appraisal of conceptual steel design. *Advanced Engineering Informatics*, 29(1), 28-46.
- [22] Giovannini, A. et al. (2012). Ontology-based system for supporting manufacturing sustainability. *Annual Reviews in Control*, 36(2), 309-317.
- [23] Amsel, N. y Tomlinson, B. (2010). Green tracker: A tool for estimating the energy consumption of software. En CHI'10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. Atlanta, USA.
- [24] Tristo, G. et al. (2015). Real time power consumption monitoring for energy efficiency analysis in micro EDM milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9-12), 1511-1521.
- [25] Hsieh, C. et al. (2011). A simple and effective digital imaging approach for tuna fish length measurement compatible with fishing operations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(1), 44-51.
- [26] Zdun, U. et al. (2013). Sustainable architectural design decisions. *IEEE software*, 30(6), 46-53.
- [27] Silva, S., Alcáda, L. y Dias, L. (2014). Development of a web-based multi-criteria spatial decision support system for the assessment of environmental sustainability of dairy farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 108, 46-57.
- [28] Roher, K. y Richardson, D. (2013). Sustainability requirement patterns. En 3rd International Workshop on Requirements Patterns. Orlando, USA.
- [29] Albertao, F. et al. (2010). Measuring the sustainability performance of software projects. En 7th International Conference on E-Business Engineering. Shanghai, China.
- [30] Goble, C. (2014). Better software, better research. *IEEE Internet Computing*, 18(5), 4-8.
- [31] Penzenstadler, B., Femmer, H. y Richardson, D. (2013). Who is the advocate? Stakeholders for sustainability. En 2nd International workshop on green and sustainable software. Amsterdam, The Netherlands.
- [32] Buyya, R. et al. (2019). A manifesto for future generation cloud computing: Research directions for the next decade. *ACM computing surveys*, 51(5), 1-38.
- [33] Condori, N. y Lago, P. (2018). Characterizing the contribution of quality requirements to software sustainability. *Journal of systems and software*, 137, 289-305.
- [34] Raturi, A. et al. (2014). Developing a sustainability non-functional requirements framework. En 3rd International Workshop on Green and Sustainable Software. Hyderabad, India.
- [35] Venters, C. et al. (2017). Characterising sustainability requirements: A new species red herring or just an odd fish? En 39th International Conference on Software Engineering. Buenos Aires, Argentina.
- [36] Aujla, G. y Kumar, N. (2018). MEnSuS: An efficient scheme for energy management with sustainability of cloud data centers in edge-cloud environment. *Future Generation Computer Systems*, 86, 1279-1300.
- [37] Howard, G. y Lubbe, S. (2012). Synthesis of green IS frameworks for achieving strong environmental sustainability in organisations. En South African Institute for computer scientists and information technologists conference. Pretoria, South Africa.
- [38] Dustdar, S. et al. (2010). A roadmap towards sustainable self-aware service systems. En Workshop on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems. Cape Town, South Africa.
- [39] Fotopoulos, F., Makropoulos, C. y Mimikou, M. (2010). Flood forecasting in transboundary catchments using the Open Modeling Interface. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1640-1649.
- [40] Ardito, L. et al. (2015). Understanding green software development: A conceptual framework. *IT profession.*, 17(1), 44-50.
- [41] Lago, P. y Jansen, T. (2011). Creating environmental awareness in service oriented software engineering. En International conference on service-oriented computing. Paphos, Cyprus.
- [42] Pearce, J. y Mushtaq, U. (2009). Overcoming technical constraints for obtaining sustainable development with open source appropriate technology. En International Conference Science and Technology for Humanity. Toronto, Canada.
- [43] Pereira, L. et al. (2014). SustData: A public dataset for ICT4S electric energy research. En ICT for Sustainability. Stockholm, Sweden.
- [44] Venters, C. et al. (2014). Software sustainability: The modern tower of babel. En Workshop on Humanities in the Semantic Web. Roma, Italy.
- [45] Hepting, D. (2007). Decision support for local environmental impact assessment. *Environmental Modelling & Software*, 22(4), 436-441.
- [46] Covas, M., Silva, C. y Dias, L. (2013). Multicriteria decision analysis for sustainable data centers location. *International Transactions in Operational Research*, 20(3), 269-299.
- [47] Lami, G. y Buglione, L. (2012). Measuring software sustainability from a process-centric perspective. En 22nd International Workshop on Software Measurement. Washington, USA.
- [48] Le, D. et al. (2016). Relating architectural decay and sustainability of software systems. En 13th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture. Venice, Italy.
- [49] Penzenstadler, B. et al. (2014). What will be the systems supporting sustainability in 15 years? En 2nd International Conference on ICT for Sustainability. Stockholm, Sweden.
- [50] Amri, R. y Bellamine, N. (2014). Towards a generic sustainable software model. En 4th International Conference on Advances in Computing and Communications. Bangkok, Thailand.
- [51] Lago, P. (2015). Challenges and opportunities for sustainable software. En 5th International Workshop on Product Line Approaches in Software Engineering. Florence, Italy.

- [52] Canovas, J. y Cabot, J. (2015). Enabling the Definition and Enforcement of Governance Rules in Open Source Systems. En 37th IEEE/ACM International Conference on Software Engineering. Florence Italy.
- [53] Mohan, K. et al. (2012). Managing disruptive and sustaining innovations in green IT. IT Professional, 14(6), 22-29.
- [54] Hossain, M. et al. (2018). Quantifying Potential of Hybrid PV/WT Power Supplies for Off-Grid LTE Base Station. En International Conference on Computer, Communication, Chemical, Material and Electronic Engineering. Rajshahi, Bangladesh.
- [55] Penzenstadler, B. et al. (2018). Software Engineering for Sustainability: Find the Leverage Points!. IEEE Software, 35(4), 22-33.
- [56] Kasurinen, J., Palacin, M. y Vanhala, E. (2017). What Concerns Game Developers? A Study on Game Development Processes, Sustainability and Metrics. En 8th Workshop on Emerging Trends in Software Metrics. Buenos Aires, Argentina.

Sistema de gestión de captación de agua de lluvia para descarga de sanitarios: Estudio de Mapeo Sistemático

Leandro Martín Crespi
Cristian Schiffino
Iris Inés Sattolo
Marisa Daniela Panizzi
Universidad de Morón
Argentina

El agua es esencial para la vida. Todas las personas, animales y plantas necesitan agua para vivir y crecer. En el caso particular del hombre, el agua es primordial para el desarrollo de muchas actividades productivas. Sin embargo, en numerosos lugares del mundo, la población no cuenta con el agua necesaria para mantener un nivel de vida aceptable. Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, también conocidas como TIC, constituyen un factor central para el desarrollo económico, social y productivo y su aplicación impacta en todas las actividades que realiza una Sociedad. Desde esta perspectiva, las TIC pueden contribuir a la sostenibilidad del uso del agua potable, mediante un sistema de gestión que permita la captación del agua de lluvia destinada para la descarga de sanitarios de una estación de servicio en la Argentina. Antes de dar inicio a la construcción del sistema de gestión de agua de lluvia, se desarrolló un Estudio de Mapeo Sistemático (SMS) con el propósito de construir el estado del arte y descubrir las soluciones existentes, cómo han sido construidas y los principales usos que se da al agua de lluvia recolectada. Se realizó una búsqueda en librerías digitales como IEEE Explore y ACM; en repositorios digitales como SEDICI, plataformas abiertas como Google Academic, ScienceDirect, Dialnet y Scielo, el período comprendido ha sido 2008 al 2018. De un total de 82 artículos encontrados, se analizaron 48 estudios primarios. En primer lugar, los estudios presentan propuestas de captación de agua de lluvia destinadas a campus universitarios y viviendas familiares y en un segundo lugar, están destinadas a desarrollos rurales, plantas industriales y comercios. La mayoría de las soluciones destinadas a campus universitarios se observan en Colombia y en segundo lugar en México. Algunos estudios se focalizan en los aspectos económicos asociados al uso del agua (análisis de costo-beneficio) y en otros en los aspectos ingenieriles para la construcción de los sistemas de captación de agua de lluvia. Este SMS permitió evidenciar la necesidad de continuar la aplicación de las TIC para contribuir a la sostenibilidad del agua potable, y en nuestra propuesta se reduce al sistema de gestión de captación de agua de lluvia para la descarga de sanitarios para una estación de servicio de la Argentina.

1. INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas, en [1], se plantea que la escasez de recursos hídricos, junto con la mala calidad del agua y el saneamiento inadecuado, repercuten en la seguridad alimentaria los medios de subsistencia y la oportunidad de educación para las familias pobres en todo el mundo. Afortunadamente, se han hecho algunos avances en la última década y más del 90% de la población mundial tiene acceso a fuentes de agua potable mejoradas.

En [2] se señala que, cuando la población no cuenta con el agua necesaria para la vida diaria, se enfrenta a muchas dificultades y está en peligro de contraer enfermedades graves. Cuando una comunidad tiene acceso al agua potable en forma fácil y segura, la salud de esta es notablemente mejor. Kofi Annan en [3] plantea que el acceso a agua apta para el consumo es una necesidad humana fundamental y, en consecuencia, un derecho humano básico. Se estima que actualmente se consume al año el 54 % del agua dulce disponible y, según la UNESCO, a mediados del siglo XXI la población mundial alcanzará los 12.000 millones de habitantes previstos, la demanda se habrá duplicado y las reservas hídricas de nuestro planeta llegarán a su tope. En [4] la Organización Mundial de la Salud (OMS) presenta que la necesidad básica de agua por día per cápita para vivir adecuadamente incluyendo la higiene personal, es de al menos 20 litros diarios de agua, lo que implica un volumen de 7.300 litros por persona al año. El acceso básico se define como disponibilidad de una fuente a menos de 1.000 metros de distancia o 20 minutos de recorrido desde el lugar de utilización, y posibilidad de obtención fiable.

En [5] se menciona que el agua es casi tan antigua como el planeta, y a pesar de que desde lejos la Tierra se ve verdeazulada y parece un lugar pleno de este elemento, no toda el agua que existe está disponible para el consumo de los seres humanos: El 71 % de la superficie terrestre está compuesta por agua, es decir: tres cuartas partes de nuestro planeta se compone de H₂O. Parece bastante, y lo es, pero el problema es su distribución y su difícil accesibilidad para ser utilizada por el ser humano. El 96,5 %, es agua salada que se encuentra en mares y océanos. Solo un 3 % del agua del planeta es dulce, donde el 1,74 % se encuentra en forma de hielo en los glaciares y casquetes polares, que hoy en día como consecuencia del cambio climático, se están derritiendo. El resto del agua se encuentra en ríos, lagos, atmósfera, etc. En [6] se pone a la vista los diferentes tipos de agua y su distribución en el planeta por medio de la tabla a la cual referenciamos en nuestra Tabla 1.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible, también conocidos como ODS, presentados en [7] están diseñados para mejorar la calidad de vida a nivel mundial; se crearon en la Conferencia de las Naciones Unidas. Los ODS son un conjunto de 17 objetivos que permiten superar desafíos globales como la pobreza, la desigualdad, el cambio climático entre otros, además buscan armonizar tres componentes centrales para el futuro: crecimiento económico, inclusión social y protección ambiental.

Tabla 1. Distribución de agua en el Planeta

Localización	Porcentaje de agua total	Tipo de agua
Mares y océanos	96,5 %	Salada
Casquetes y glaciares polares	1,74 %	Dulce
Agua subterránea salada	0,94 %	Salada
Agua subterránea dulce	0,76 %	Dulce
Glaciares continentales y permafrost ¹	0,022 %	Dulce
Lagos de agua dulce	0,007 %	Salada
Humedad del suelo	0,006 %	Dulce
Atmósfera	0,001 %	Dulce
Embalses	0,001 %	Dulce
Ríos	0,0008 %	Dulce
Lagos de agua salada	0,0002 %	Dulce
Agua biológica	0,0001 %	Dulce

En [5] se discute que, se debería concientizar a la población respecto a dos aspectos significativos vinculados a la sustentabilidad del agua. En un primer lugar, cambiar la percepción de que el agua es un recurso ilimitado, y mostrar que el gasto de agua es también energético, ya sea para extraerla (si se trata de pozos), trasladarla y potabilizarla. En segundo lugar, mostrar que existen soluciones al alcance de cualquier grupo dispuesto a trabajar, innovar y adoptar formas alternativas para captarla y manejarla de mejor manera.

Con base en esta problemática de la escasez del recurso hídrico para las generaciones actuales y futuras, además de seguir los lineamientos de los ODS, en esta investigación se propone la captación de agua de lluvia en aplicaciones en las que no es necesario el uso de agua potable. Como objetivo a largo plazo se propone la construcción de un sistema de gestión de captación de agua de lluvia para descarga de sanitarios en una estación de servicio en la Argentina. Antes de comenzar con la definición del mismo se decidió analizar la literatura existente en este tema mediante el desarrollo de un Estudio de Mapeo Sistemático (Systematic Mapping Study SMS) de acuerdo con el proceso propuesto en [8, 9].

Este capítulo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 describe el desarrollo del SMS y la planificación del SMS; la Sección 3, exhibe la ejecución. Los resultados obtenidos se presentan en la Sección 4. La discusión sobre las amenazas a la validez del SMS se pone a la vista en la Sección 5, y finalmente las conclusiones y los futuros trabajos se describen en la Sección 6.

2. MÉTODO

2.1 Planificación del SMS

En esta subsección se presenta la definición del protocolo del SMS: preguntas de investigación, estrategia de búsqueda, criterios y proceso de selección, formulario de extracción y el proceso de síntesis de los datos. El objetivo de este SMS es responder la siguiente pregunta de investigación (PI): *¿Cuál es el estado del arte sobre el mejoramiento de la sustentabilidad del agua potable (apto para consumo humano) empleando agua de lluvia como sustituto?* Esta pregunta principal se descompone en un conjunto de sub-preguntas (PI1-6), las cuales se presentan en la Tabla 2 junto a la motivación de cada una de ellas (MO1-6).

Tabla 2. Preguntas de investigación (PI) y motivación (MO)

Ref.	Preguntas	Ref.	Motivación
PI1	¿Qué métodos existen que permitan recolectar y utilizar agua de lluvia?	MO1	Determinar los tipos de sistemas ya existentes en el ámbito privado. Identificar mecánicas de recolección y posterior uso.
PI2	¿Qué factores determinan la recolección de agua de lluvia y que finalidad tiene?	MO2	Reconocer las principales necesidades a tener en cuenta en la recolección y su motivación.
PI3	¿Qué aspectos se tienen en cuenta en la automatización del proceso de recolección y uso de agua de lluvia?	MO3	Determinar el grado de automatización de los procesos de recuperación y uso de agua de lluvia.
PI4	¿Qué tipo de contribución se ha realizado a nivel académico acerca de la gestión de recolección y utilización de agua de lluvia?	MO4	Encontrar el tipo de resultados de investigación obtenidos en el contexto de los métodos de automatización de recolección y utilización de agua de lluvia.
PI5	¿Cuáles son los principales usos del agua de lluvia recolectada?	MO5	Descubrir los usos para los cuales se destina el agua de lluvia recolectada.
PI6	¿Cuáles son los tipos de investigación de los artículos?	MO6	Identificar los tipos de investigación de los artículos de acuerdo con la clasificación de Wieringa et al. propuesta en [10].

Se decidió realizar una búsqueda automática en las librerías, repositorios y plataformas digitales descritas en la Tabla 3, se consideraron artículos de congresos, artículos de revistas y tesis. La búsqueda se realizó en el período comprendido entre el 2008 hasta diciembre del 2018. A pesar de que los Objetivos de Desarrollo del Milenio se propusieron en el año 2000 recién en el año 2012 se crearon los ODS. Se decidió llevar a cabo la búsqueda desde el

¹ Capa de hielo permanente en los niveles superficiales del suelo de las regiones muy frías o periglaciares.

año 2008 para descubrir si existían evidencias de concientización sobre la sustentabilidad del uso del agua potable y su repercusión a partir de los Objetivos de Desarrollo del Milenio.

Tabla 3. Bibliotecas, repositorios y plataformas digitales utilizadas

Bibliotecas/Repositorios/Plataformas	Opciones
Google Academic	Artículos de congresos, artículos de revistas y tesis
SEDICI	Artículos de congresos, artículos de revistas y tesis
Biblioteca digital de ACM	Artículos de congresos, artículos de revistas y tesis
IEEE Xplore	Artículos de congresos, artículos de revistas y tesis
ScienceDirect	Artículos de congresos, artículos de revistas y tesis
Dialnet	Artículos de congresos, artículos de revistas y tesis
Scielo	Artículos de congresos, artículos de revistas y tesis

En una primera instancia y como mecanismo de prueba de las bibliotecas, repositorios y plataformas digitales, se realizó una búsqueda piloto con la cadena que se encuentra en la Tabla 4. Esta cadena se descartó dado que su extensión no permitía realizar búsquedas por su formato y longitud, además de devolver artículos que no resultaron relevantes para la investigación. Los términos se emplearon en el idioma español, así como también en el idioma inglés. A partir de los resultados obtenidos con la búsqueda piloto, surgió la necesidad de rediseñar la cadena utilizada en primera instancia y dividirla en un conjunto de cadenas con el propósito de que los resultados obtenidos en la búsqueda permitan responder a las preguntas de investigación definidas en el SMS. La Tabla 5 presenta las cadenas definitivas para la búsqueda.

Tabla 4. Cadena de la búsqueda piloto.

Cadena de la búsqueda piloto
(sistema AND "agua lluvia" AND ahorro) OR (gestión AND "agua lluvia" AND sustentable AND edificio) OR (recolección AND "agua lluvia" AND edificio) OR ("agua lluvia" AND recolección AND gestión) OR (system AND rainwater AND saving) OR (management AND rainwater AND sustainable AND bulding) OR (harvest AND rainwater AND bulding) OR (rainwater AND harvest AND management)

Tabla 5. Cadenas de búsqueda definitivas.

Ref.	Cadena
C1	Automatización AND Recolección AND agua lluvia
C2	Agua Lluvia AND (Recolección OR Captación) AND Sistema
C3	(Utilización OR uso OR consumo) AND Agua lluvia
C4	Rainwater AND Electronical AND (Harvest OR Collection)
C5	Rainwater AND (Harvest OR Collection) AND System
C6	(Utilization OR Use) AND Rainwater

Los criterios de inclusión y exclusión utilizados para el proceso de selección se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión:
Artículos del 2008 hasta diciembre del 2018.
Artículos en el idioma inglés y español.
Artículos que contengan cadenas candidatas en el título y/o en el resumen.
Artículos duplicados: si hay varios artículos de un mismo autor que contemple la misma investigación, se considerara el más completo.
Criterios de exclusión:
Artículos que no cumplan los criterios de inclusión.
Artículos sin revisión por pares.
Artículos que estén relacionados a la recolección de agua para ser utilizada en riego agropecuario y forestal.
Artículos que se encuentren en formato de resumen, presentaciones en power point y libros.

Es importante mencionar que si bien el método del SMS propuesto en [8, 9] sugiere que la búsqueda debe realizarse sobre metadatos homogéneos en las librerías digitales, dada la diversidad de librerías digitales, repositorios y plataformas empleadas (en abierto o por suscripción), se debió realizar la búsqueda combinando los metadatos considerando en algunos casos el título y en otros el título y/o resumen.

El proceso de selección de los estudios consistió en los siguientes pasos: 1) realizar la búsqueda en las fuentes definidas aplicando la cadena en el título y/o en el resumen, 2) eliminar los artículos duplicados, 3) aplicar los criterios de inclusión y exclusión en el título, resumen y palabras clave, 4) aplicar los criterios de inclusión y exclusión al texto completo. Este proceso permitió la selección de los estudios primarios que se analizaron para dar respuesta a las preguntas de investigación (PI) formuladas.

Para dar respuesta a cada una de las preguntas de investigación (PI) se definió un esquema de clasificación. Algunas de las categorías del esquema de clasificación se definieron durante la planificación del SMS, otras surgieron a partir

de la lectura del artículo completo. La descripción de las categorías utilizadas en el esquema de clasificación se presenta en la Tabla 7. El formulario de extracción de datos que se presenta en la Tabla 8, se compone de dos partes; la primera se refiere a los metadatos de cada uno de los estudios primarios y la segunda se refiere a cada una de las preguntas de investigación (PI). Para la comprensión de algunas categorías ha sido necesario desarrollar un glosario de términos, el cual se presenta en la Tabla 9. Con el propósito de responder cada una de las preguntas de investigación, se planificó realizar una síntesis temática basada en el esquema de clasificación definido (Tabla 7) exhibiendo los resultados por medio de tablas y texto.

Tabla 7. Esquema de clasificación de estudios primarios

Dimensión	Categorías
Métodos	Los métodos que permitan recolectar y utilizar agua de lluvia son los siguientes: Tanque en techo, Laguna artificial, Tanque Subterráneo, Bombeo, Tratamiento de agua, Habitáculo de recolección lateral (A nivel de suelo), Biológica, Capta nieblas, Microcuena, Aljibe, Otros y No informa. Agrupa el método, forma o metodología de almacenamiento del agua de lluvia captada.
Factores	Los factores que determinan la recolección de agua de lluvia y que finalidad tienen son los siguientes: Escasez de agua, Inundaciones, Costo económico de agua, Mala calidad de agua corriente, Valores sociales, Sustentabilidad, Otros, No informa. Agrupa el factor o motivo por el cual se realiza la captación y utilización del agua de lluvia captada.
Tipos de automatización	Los aspectos que se tienen en cuenta en la automatización del proceso de recolección y uso de agua de lluvia: Informatizado, Por sensores, Electrónica, Llenado automático, Aperturas de válvulas, Alertas de estado, Verificación de calidad de agua, Otros, No informa. Agrupa los tipos de automatización detectados con los que se realiza la captación y utilización del agua de lluvia captada. Existen distintos tipos de automatización de acuerdo con lo expresado en el párrafo anterior, algunos de ellos también se utilizan de forma combinada para alcanzar el objetivo planteado. Hay tipos de automatización que se ocupan mediante sensores y electrónicas de realizar aperturas de válvulas, o de mejorar la calidad de agua. También existe automatización mediante sensores y bombas para llenar tanques automáticamente, entre otros ejemplos varios.
Contribución	Los tipos de contribución se ha realizado a nivel académico acerca de la gestión de recolección y utilización de agua de lluvia son los siguientes: Estadísticas, Herramientas, Procesos, Ingeniería Civil, Concientización, Electrónica, Ingeniería Hidráulica, Ingeniería Electromecánica, Ciencias Ambientales, Ingeniería Industrial, Arquitectura, Otros, No informa. Agrupa la contribución en función de aporte realizado en la captación y utilización del agua de lluvia captada.
Principales usos	Los principales usos del agua de lluvia recolectada son los siguientes: Lavado de Ropa, Lavado de Autos, Aseo de superficies, Riego como actividad secundaria, Descarga de sanitarios, Consumo humano, Ducha, Incendio, Todo Uso, Otros, No informa. Agrupa los principales usos detectados del agua de lluvia captada. Aunque el agua de lluvia sin un proceso de potabilización no puede ser ingerida por los seres humanos, en algunas casas o ciudades se la utiliza ya sea porque es la única forma de obtener agua, o porque la misma es sometida a los procesos correspondientes para poder ser apta para el consumo. Es importante aclarar, que el término Todo Uso indica que el agua recolectada puede ser utilizada para cualquier fin sin destacar un tipo de uso específico. En cambio, el término Consumo Humano determina que el agua recolectada solamente será utilizada con ese fin, descartando así cualquier otro tipo de uso.
Tipos de Investigación	Los tipos de investigación de los artículos son: investigación de evaluación, artículo filosófico, propuesta de solución, investigación de validación, reporte de experiencia personal, artículo de opinión. Se utilizó la clasificación de tipos de investigación propuesta por Wieringa <i>et al.</i> en [10].

Tabla 8. Formulario de extracción de datos

Metadatos	Id Artículo, Año, Título, Autor/es, Nombre de la publicación, Tipo de publicación (revista, congreso o tesis), País, Palabras clave.
PI/Dimensión	Categorías
PI1/Métodos de recolección de agua de lluvia	Tanque en techo, Laguna artificial, Tanque Subterráneo, Bombeo, Tratamiento de agua, Habitáculo de recolección lateral (A nivel de suelo), Biológica, Capta nieblas, Microcuena, Aljibe, Otros y No informa.
PI2/ Factores y finalidad de la recolección del agua de lluvia	Escasez de agua, Inundaciones, Costo económico de agua, Mala calidad de agua corriente, Valores sociales, Sustentabilidad, Otros, No informa.
PI3/ Aspectos de automatización	Informatizado, Por sensores, Electrónica, Llenado automático, Aperturas de válvulas, Alertas de estado, Verificación de calidad de agua, Otros, No informa.
PI4/ Tipos de Contribución	Estadísticas, Herramientas, Procesos, Ingeniería Civil, Concientización, Electrónica, Ingeniería Hidráulica, Ingeniería Electromecánica, Ciencias Ambientales, Ingeniería Industrial, Arquitectura, Otros, No informa.
PI5/ Usos del agua recolectada	Lavado de Ropa, Lavado de Autos, Aseo de superficies, Riego como actividad secundaria, Descarga de sanitarios, Consumo humano, Ducha, Incendio, Todo Uso, Otros, No informa.
PI6/ Tipos de investigación	Investigación de evaluación, artículo filosófico, propuesta de solución, investigación de validación, reporte de experiencia personal, artículo de opinión. Se utilizó la clasificación de tipos de investigación propuesta por Wieringa <i>et al.</i> en [10].

Tabla 9. Glosario de términos

Término	Definición
Tanque en techo	Tanque de reserva de agua que se encuentran instalados generalmente sobre el techo de edificio. Son utilizados usando el potencial de gravedad.
Laguna artificial	Espacios excavados generalmente sobre tierra emulando lagunas de origen natural.

Tanque Subterráneo	Reservorio de almacenamiento cerrado bajo suelo.
Bombeo	Método mecánico para la movilización de fluidos.
Tratamiento de agua	Proceso intervenido por el ser humano por el cual se altera las condiciones iniciales del agua a tratar.
Habitáculo de recolección lateral (A nivel de suelo)	Construcción anexada al edificio techada sobre nivel suelo apta para reservorio de agua.
Biológica	Mecanismo de absorción en el cual intervienen organismos vivos. Frecuentemente se utilizan las plantas simulando jardines verticales, permitiendo de esta forma la recolección de agua de lluvia.
Capta nieblas	Son un sistema para atrapar las gotas de agua microscópicas que contiene la neblina. También conocido como atrapa nieblas.
Microcuenca	Espacio a cielo abierto de reducidas dimensiones, puede ser natural o artificial.
Aljibe	Recipiente total o parcialmente subterráneo, construido o labrado, cubierto por una bóveda de cañón o ligeramente apuntada o en cúpula de casquete, hecha de ladrillo.

2.2 Ejecución del SMS

En esta subsección, se presenta la búsqueda realizada en las librerías/repositorios y plataformas digitales, la selección de estudios primarios de acuerdo con lo definido en el protocolo de revisión del SMS. Se aplicó la cadena de búsqueda en las librerías/repositorios y plataformas digitales definidas la estrategia de búsqueda (Tabla 3), se encontraron 82 artículos.

La selección de los estudios primarios ha sido realizada por los dos investigadores en formación respetando el proceso de selección definido en el protocolo de revisión. En paralelo, la investigadora formada del proyecto de investigación replicó el proceso de selección para la obtención de estudios primarios. Los dos conjuntos de estudios primarios se validaron por los becarios de investigación, la directora y la investigadora formada, se discutieron las discrepancias con el propósito de determinar que estudios eran apropiados de incluir o no en el estudio. Finalmente, luego de aplicar el proceso de selección, se consideraron 48 estudios primarios para su análisis con el propósito de dar respuesta a las preguntas de investigación definidas. La lista completa de los estudios primarios seleccionados se encuentra en la Tabla 10.

Tabla 10. Listado de estudios primarios

Id	Estudio Primario
[EP1]	Estupiñán Perdomo, J. L. y Zapata García, H. O. (2010). Requerimientos de infraestructura para el aprovechamiento sostenible del agua lluvia en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana Bogotá.
[EP2]	Carvajal, G. y Danny, A. (2016). Prototipo sistema automatizado de recolección de agua lluvia doméstico. Corporación Universitaria Minuto De Dios - Tecnología en Automatización Industrial.
[EP3]	Diomar, A. O. (2017). Implementación de un sistema automático para el aprovechamiento del agua lluvia y el agua residual de la lavadora. Instituto Tecnológico Metropolitano.
[EP4]	Duque Bonilla, J. A. y Salazar Gil, J. (2013). Factibilidad económica y financiera de un sistema de captación, recolección y reutilización de agua pluvial aplicable en las instituciones educativas básicas primaria y secundaria en la ciudad de Pereira. Universidad Libre Seccional Pereira.
[EP5]	Hernández García Edgar, G. L. (2017). Innovaciones en Mecatrónica. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. - ISBN 978-607-9394-11-0.
[EP6]	Reyes Escobar, W. A. (2015). Diseño de una propuesta para la reducción del KPI de días de inventario de material de empaque, mediante métodos de planificación y diseño de un sistema de recolección de agua de lluvia para la planta Malher zona 12. Universidad De San Carlos De Guatemala.
[EP7]	Vera Mercado, E. J. Riátiga Fandiño, H. y Castro Molano, L. (2016). Evaluación del uso racional de agua y energía en una institución educativa. Universidad De Santander.
[EP8]	Gómez Orozco, J. E. y Molina López, E. (2016). Viabilidad financiera y beneficios ambientales de sistemas de aprovechamiento de agua no convencionales en la zona urbana de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira,
[EP9]	Castro Vanoye, P. A. (2016). Uso de agua gris y agua pluvial en desarrollos urbanos de alto poder adquisitivo en México. Universidad Politécnica de Catalunya.
[EP10]	Arengas Reinés, M. F. y Bernal Meneses, J. A. (2016). Estudio de pre-factibilidad para el montaje de una empresa dedicada a la venta de sistemas de aprovechamiento de aguas de lluvia en el sector químico, agroindustrial y residencial de Bogotá D.C. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
[EP11]	Palacio Castañeda, N. (2010). Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución educativa María Auxiliadora de Caldas, Antioquia. Universidad de Antioquia.
[EP12]	Santamarta Cerezal, J. C. y Seijas Bayón, J. (2010). Fundamentos y tecnologías para la captación y uso del agua procedente de la lluvia horizontal en los Montes Canarios. Revista Montes 1.er Trimestre 2010 - N.O 100.
[EP13]	Cruz Martínez, A. Sandoval, A. P. Trejo Calzada, R. Sánchez Cohen, I. Samaniego Gaxiola, J. A. y Hernández Salgado, R. (2016). Captación de agua de lluvia y retención de humedad edáfica en el establecimiento de buffel. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarías - Versión On-line ISSN 2448-6698 Versión Impresa ISSN 2007-1124.
[EP14]	Chino Calli, M. Velarde Coaquira, E. y Espinoza Calsín, J. (2016). Captación de agua de lluvia en cobertura de viviendas Rurales para consumo humano en la comunidad de Vilca Maquera, Puno-Perú. Rev. Investig. Altoandín. 2016; Vol 18 N° 3: 365 - 373.
[EP15]	Salinas López, J. C. Cavazos González, R. A. y Vera Herrera, J. A. (2016). Evaluación de un sistema de captación de agua de lluvia en la zona metropolitana de Monterrey, para su aprovechamiento como medio alternativo. Ingeniería ISSN: 1665-529X. Universidad Autónoma de Yucatán, México.
[EP16]	Herrera Monroy, L. A. (2010). Estudio de alternativas, para el uso sustentable del agua de lluvia. México: Instituto Politécnico Nacional.
[EP17]	Arboleda Montaño, N. (2016). Diagnóstico del sistema de aprovechamiento del agua lluvia en el consejo comunitario de la comunidad negra de Los Lagos, Buenaventura. Revista Luna Azul, núm. 43, julio-diciembre, 2016, pp. 29-55 - E-ISSN: 1909-2474.

[EP18]	Mejía Piña, G. E. y Salamea Cobos, P. A. (2011). Diseño de un sistema para reciclado, control y utilización de agua lluvia en la ciudad de Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana.
[EP19]	Pacheco Montes, M. (2008). Avances en la gestión integral del agua lluvia (GIALL): contribuciones al consumo sostenible del agua, el caso de "Lluviati" en México. Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo - Año 2008 N 3.
[EP20]	Pérez Hernández, A. Palacios Vélez, O. L. Anaya Garduño, M. y Tovar Salinas, J. L. (2017). Agua de lluvia para consumo humano y uso doméstico en San Miguel Tulancingo, Oaxaca. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.8 Núm.6 14 de agosto - 26 de septiembre, 2017 p. 1427-1432.
[EP21]	Guyot-Téphany, J. Grenier, C. y Orellana, D. (2011). Informe Galápagos 2011 - 2012. Informe Galápagos 2011 - 2012 - ISBN-978-9942-944-00-9.
[EP22]	Suárez, A. Mesa, P. Bravo, V. y Prieto, A. (2015). Evaluación de un sistema de filtros de cascarilla de arroz y luffa cylindrica para el tratamiento de aguas lluvias. Mutis. Vol. 5 (1) pp. 21-27.
[EP23]	Sandoval Betancourth, G. (2016). Ventajas económicas del aprovechamiento del agua lluvia. Equidad Desarro. ISSN 1692-7311 - N.º 26: 101-113 - julio-diciembre del 2016.
[EP24]	Lossio Aricoché, M. (2012). Sistema de abastecimiento de agua potable para cuatro poblados rurales del distrito de Lancones. Universidad de Piura.
[EP25]	Bocanegra Gamarra, C. A. y Almanza Pérez, C. A. (2015). Diseño de sistema piloto de almacenamiento de agua lluvia a escala laboratorio en la sede Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena. Universidad de Cartagena.
[EP26]	Nara, F. L. (2012). Sistema colector de agua de lluvia: estudio de factibilidad para la aplicación residencial en el A.M.B.A. ITBA.
[EP27]	Ramírez Arcila, H. y Ospina Zúñiga, O. (2014). Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia. Ingeniería Solidaria - Vol 10 No 17 (2014).
[EP28]	Demartini, J. I. Bertoni, G. A. y Piga, L. (2018). Recolección y reutilización de las aguas de lluvia en edificios como beneficio para las ciudades. CRETA.
[EP29]	Brignoli, D. (2017). Estudio de la calidad del agua de lluvia, para el consumo humano y productivo en Los Talas, partido de Berisso. Universidad Nacional de La Plata.
[EP30]	Saposnik, S. Maidana, A. Bellot, R. y Aguirre, G. (2018). Diseño y adaptación tecnológica del retardador pluvial en las residencias de la ciudad de Santa Fe. CRETA.
[EP31]	Gómez, E. H. (2016). Estrategias de diseño ambientalmente consciente aplicado a una vivienda unifamiliar en Villa Garibaldi. Universidad Nacional de La Plata.
[EP32]	Diulio, M. d. (2015). Reacondicionamiento ambientalmente consciente de viviendas de baja densidad. Universidad Nacional de La Plata.
[EP33]	López Hernández, N. A. Palacios Vélez, O. L. Anaya Garduño, M. Chávez Morales, J. Rubiños Panta, J. E. y García Carrillo, M. (2017). Diseño de sistemas de captación del agua de lluvia: alternativa de abastecimiento hídrico. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.8 Núm.6 14 de agosto - 26 de septiembre, 2017 p. 1433-1439.
[EP34]	Agatón, A. L. Córdoba Ruiz, J. C. y Carreño Sayago, U. F. (2015). Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos. Universidad Distrital FJC.
[EP35]	Rojas Valencia, M. N. Gallardo Bolaños, J. R. y Martínez Coto, A. (2012). Implementación y caracterización de un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia. Universidad Nacional Autónoma de México.
[EP36]	Berardi, R. N. (2015). Medidas de reacondicionamiento de viviendas de baja densidad para un hábitat tendiente a la sustentabilidad. Universidad Nacional de La Plata.
[EP37]	Rey, G. y Sánchez del Hierro, M. A. (2015). Adaptación de una vivienda pro.cre.ar a una vivienda bioclimática en la ciudad de Rauch, Provincia de Buenos Aires. Universidad Nacional de La Plata.
[EP38]	Espinoza Correa, J. E. Solano de la Sala Monteros, C. A. Espinoza Urgilés, F. L. Barreto, G. y Germán, F. (2015). Sistema de captación de agua de lluvia para uso doméstico en la Isla Jambelí, Cantón Santa Rosa. Revista Cumbres. 3(1) 2017: pp. 151 - 159 - Revista Científica ISSN 1390-9541(p) 1390-3365€.
[EP39]	Arroyave Rojas, J. A. Díaz Vélez, J. C. Vergara, D. M. y Macías, N. D. (2011). Evaluación económica de la captación de agua Lluvia como fuente alternativa de recurso hídrico en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Producción + Limpia -Enero - Junio de 2011. Vol.6, No.1 - 76-84.
[EP40]	Férez Martínez, M. (2011). El acopio de agua de lluvia en la cuenca del Mar Menor. Universidad de Murcia.
[EP41]	Notaro, V. Liuzzo, L. Freni, G. (2016). Reliability analysis of rainwater harvesting systems in Southern Italy. International Conference on Efficient & Sustainable Water Systems Management toward Worth Living Development, 2nd EWaS 2016.
[EP42]	Betasolo, M. L. y Smith, C. A. Axiomatic design process in developing a model prototype rainwater harvesting infrastructure. The 10th International Conference on Axiomatic Design, ICAD 2016 - Department of Civil Engineering Papua New Guinea University of Technology (pág. 2016).
[EP43]	Ghimire, S. R. Johnston, J. M. Ingwersen, W. W. y Sojkad, S. (2016). Life cycle assessment of a commercial rainwater harvesting system compared with a municipal water supply system. Journal of Cleaner Production.
[EP44]	Reitano, R. (2011). Water harvesting and water collection systems in mediterranean area. The case of Malta . 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities .
[EP45]	Yie Ru, C. Chao Hsien, L. Chih Yang, H. Yao Lung, T. y Hsueh Hsien, C. (2009). Applying GIS-based rainwater harvesting design system in the water-energy conservation scheme for large cities. 2009 13th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design.
[EP46]	Yie Ru, C. Chao Hsien, L. y Hsueh Hsien, C. (2008). GIS-based decision supporting system in hydraulic simulation and economic analysis for rainwater harvesting design. 2008. 12th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design.
[EP47]	Jia, R. Xie, J. Song, S. y Liu, D. (2011). A study on value estimation, collection and utilization of rainwater resources in cities of northern china. 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection.
[EP48]	Colom Reyes, M. Soriano Gómez, A. Hernández Martínez, J. Trejo Perea, M. Chávez Alegría, O. y Ríos Moreno, G. (2017). Rainwater harvesting for household use. 2017 XIII International Engineering Congress (CONIIN).

Con el propósito de incrementar la cantidad de artículos relevantes, se aplicó el método *bola de nieve* (*snowballing*) de acuerdo con los lineamientos sugeridos por Wohlin [11]. Una vez que se identifica un estudio primario en una de las fuentes de búsqueda, se explora de manera recursiva las referencias del estudio utilizando los mismos criterios definidos para la búsqueda. Finalmente, luego de aplicar el método *bola de nieve* no se encontró ningún artículo para ser considerado en el análisis.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta subsección, se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis de los datos registrados en el formulario de extracción de datos definido, con el objetivo de responder a las preguntas de investigación (PI) formuladas previamente. La síntesis de los resultados se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Síntesis de estudios primarios analizados por preguntas de investigación

Preguntas de investigación (PI)	Distribución de estudios primarios por preguntas de investigación (PI)
P1: ¿Qué métodos existen que permitan recolectar y utilizar agua de lluvia?	Tanque en techo: Vera Mercado, E. et al. [EP07], Gómez Orozco, J. et al. [EP08], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Pacheco Montes, M. [EP19], Lossio Aricoché, M. [EP24], Bocanegra Gamarra, C. et al. [EP25], Nara, F. et al. [EP26], Demartini, J. et al. [EP28], Saposnik, S. et al. [EP30], Gómez, E. [EP31], Rey, G. et al. [EP37], Notaro, V. et al. [EP41], Jia, R. et al. [EP47], Colom Reyes, M. et al. [EP48].
	Laguna artificial: Lossio Aricoché, M. [EP24], Demartini, J. et al. [EP28], Berardi R. [EP36].
	Tanque Subterráneo: Duque Bonilla, J. et al. [EP04], Reyes Escobar, W. et al. [EP06], Vera Mercado, E. et al. [EP07], Castro Vanoye, P. [EP09], Palacio Castañeda, N. [EP11], Herrera Monroy, L. [EP16], Bocanegra Gamarra, C. [EP25], Demartini, J. [EP28], Gómez, E. [EP31], Diulio, M. [EP32], López Hernández, N. et al. [EP33], Agatón, A. et al. [EP34], Rojas Valencia, M. et al. [EP35], Berardi, R. [EP36], Espinoza Correa, J. et al. [EP38], Notaro, V. et al. [EP41], Reitano R. [EP44].
	Bombeo: Estupiñán Perdomo, J. et al. [EP01], Carvajal, G. et al. [EP02], Diomar, A. [EP03], Duque Bonilla, J. et al. [EP04], Reyes Escobar, W. et al. [EP06], Vera Mercado, E. et al. [EP07], Gómez Orozco, J. et al. [EP08], Arengas Reinés, M. [EP10], Palacio Castañeda, N. [EP11], Chino Calli, M. [EP14], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Pérez Hernández, A. et al. [EP20], Bocanegra Gamarra, C. [EP25], Nara, F. et al. [EP26], Demartini, J. et al. [EP28], Gómez, E. [EP31], Diulio, M. [EP32], Agatón, A. et al. [EP34], Rojas Valencia, M. et al. [EP35], Ghimire, S. et al. [EP43].
	Tratamiento de agua: Castro Vanoye, P. [EP09], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Pérez Hernández, A. et al. [EP20], Suárez, A. et al. [EP22], Lossio Aricoché, M. [EP24], Ramírez Arcila, H. et al. [EP27], Demartini, J. et al. [EP28], Rojas Valencia, M. et al. [EP35], Ghimire, S. et al. [EP43].
	Habitáculo de recolección lateral (A nivel de suelo): Carvajal, G. et al. [EP02], Diomar, A. [EP03], Reyes Escobar, W. et al. [EP06], Arengas Reinés, M. [EP10], Arboleda Montañoi, N. [EP17], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Lossio Aricoché, M. [EP24], Bocanegra Gamarra, C. [EP25], Saposnik, S. et al. [EP30], Arroyave Rojas, J. [EP39], Ghimire, S. et al. [EP43].
	Biológica: Santamarta Cereza, J. [EP12].
	Capta nieblas: Hernández García, E. [EP05], Santamarta Cereza, J. [EP12].
	Microcuena: Estupiñán Perdomo, J. [EP01], Cruz Martínez, A. et al. [EP13], Pérez Hernández, A. [EP20], Aricoché, M. [EP24], Férrez Martínez, M. [EP40].
	Aljibe: Santamarta Cereza, J. [EP12], Chino Calli, M. [EP14], Pacheco Montes, M. [EP19], Férrez Martínez, M. [EP40].
P2: ¿Qué factores determinan la recolección de agua de lluvia y que finalidad tiene?	Otros: Arboleda Montañoi, N. [EP17], Pacheco Montes, M. [EP19], Suárez, A. [EP22], Betasolo, M. et al. [EP42].
	No informa: Salinas López, J. et al. [EP15], Guyot-Téphany J. et al. [EP21], Sandoval Betancourth, G. [EP23], Brignoli, D. [EP29], Yie Ru, C. et al. [EP45], Yie Ru, C. et al. [EP46].
	Escasez de agua: Estupiñán Perdomo, J. et al. [EP01], Carvajal, G. et al. [EP02], Duque Bonilla, et al. [EP04], Hernández García, E. [EP05], Gómez Orozco, J. et al. [EP08], Arengas Reinés, M. [EP10], Palacio Castañeda, N. [EP11], Santamarta Cereza, J. [EP12], Cruz Martínez, A. et al. [EP13], Chino Calli, M. [EP14], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Arboleda Montañoi, N. [EP17], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Pacheco Montes, M. [EP19], Pérez Hernández, A. [EP20], Guyot-Téphany, J. et al. [EP21], Suárez, A. et al. [EP22], Sandoval Betancourth, G. [EP23], Lossio Aricoché, M. [EP24], Bocanegra Gamarra, C. [EP25], Nara, F. et al. [EP26], Ramírez Arcila, H. et al. [EP27], Brignoli, D. [EP29], Rojas Valencia, M. et al. [EP35], Espinoza Correa, J. et al. [EP38], Notaro, V. et al. [EP41], Betasolo, M. et al. [EP42], Ghimire, S. et al. [EP43], Reitano, R. [EP44], Jia R. et al. [EP47], Colom Reyes, M. et al. [EP48].
	Prevenir inundaciones: Demartini, J. et al. [EP28], Saposnik, S. et al. [EP30], Colom Reyes, M. et al. [EP48].
	Costo económico de agua: Diomar, A. [EP03], Vera Mercado, E. et al. [EP07], Castro Vanoye, P. [EP09], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Guyot-Téphany, J. et al. [EP21], Sandoval Betancourth, G. [EP23], López Hernández, N. et al. [EP33], Rojas Valencia, M. et al. [EP35], Colom Reyes, M. et al. [EP48].
	Mala calidad de agua corriente: Hernández García, E. [EP05], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Guyot-Téphany, J. et al. [EP21], Brignoli, D. [EP29], Reitano, R. [EP44].
	Valores sociales: Castro Vanoye, P. [EP09], Agatón, A. et al. [EP34], Yie Ru, C. et al. [EP45], Yie Ru, C. et al. [EP46].
	Sustentabilidad: Diomar, A. [EP03], Castro Vanoye, P. [EP09], Chino Calli, M. [EP14], Salinas López, J. et al. [EP15], Demartini, J. [EP28], Brignoli, D. [EP29], Saposnik, S. et al. [EP30], Gómez, E. [EP31], Diulio, M. [EP32], López Hernández, N. et al. [EP33], Agatón, A. et al. [EP34], Berardi, R. [EP36], Rey, G. et al. [EP37], Arroyave Rojas, J. et al. [EP39], Reitano, R. [EP44], Jia, R. et al. [EP47].
	No informa: Reyes Escobar, et al. [EP06], Férrez Martínez, M. [EP40].
	Informatizado: Carvajal, G. et al. [EP02], Diomar, A. [EP03].
P13: ¿Qué aspectos se tienen en cuenta en la automatización del proceso de recolección y uso de agua de lluvia?	Sensores: Carvajal, G. et al. [EP02], Diomar, A. [EP03], Duque Bonilla, et al. [EP04], Hernández García, E. [EP05], Vera Mercado, E. et al. [EP07], Arengas Reinés, M. [EP10], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Bocanegra Gamarra, C. [EP25], Arroyave Rojas, J. [EP39].
	Electrónica: Carvajal, G. et al. [EP02], Diomar, A. [EP03], Duque Bonilla, J. et al. [EP04], Hernández García, E. [EP05], Vera Mercado, E. et al. [EP07], Gómez Orozco, J. et al. [EP08], Arengas Reinés, M. [EP10], Palacio Castañeda, N. [EP11], Chino Calli, M. [EP14], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Pérez Hernández, A. et al. [EP20], Bocanegra Gamarra, C. [EP25], Demartini, J. et al. [EP28], Rojas Valencia, M. et al. [EP35], Berardi, R. [EP36], Arroyave Rojas, J. [EP39].
	Aperturas de válvulas: Carvajal, G. et al. [EP02], Duque Bonilla, et al. [EP04], Lossio Aricoché, M. [EP24], Diulio, M. [EP32], Ghimire, S. et al. [EP43].

<p>PI4: ¿Qué tipo de contribución se ha realizado a nivel académico acerca de la gestión de recolección y utilización de agua de lluvia?</p>	<p>Verificación de calidad de agua: Cruz Martínez, A. et al. [EP13], Arboleda Montañoi, N. [EP17], Pérez Hernández, A. et al. [EP20], Suárez, A. et al. [EP22], Lossio Aricoché, M. [EP24], Ramírez Arcila, H. et al. [EP27], Brignoli, D. [EP29].</p> <p>Otros: Diomar, A. [EP03], Hernández García, E. [EP05], Lossio Aricoché, M. [EP24].</p> <p>No informa: Estupiñán Perdomo, J. et al. [EP01], Reyes Escobar, et al. [EP06], Castro Vanoye, P. [EP09], Santamarta Cereza, J. [EP12], Salinas López, J. et al. [EP15], Pacheco Montes, M. [EP19], Guyot-Téphany, J. et al. [EP21], Sandoval Betancourth, G. [EP23], Nara, F. et al. [EP26], Saposnik, S. et al. [EP30], Gómez, E. [EP31], López Hernández, N. et al. [EP33], Agatón, A. et al. [EP34], Rey G., et al. [EP37], Espinoza Correa, J. et al. [EP38], Férrez Martínez, M. [EP40], Notaro, V. et al. [EP41], Betasolo, M. et al. [EP42], Reitano, R. [EP44], Yie Ru, C. et al. [EP45], Yie Ru, C. et al. [EP46], Jia, R. et al. [EP47], Colom Reyes, M. et al. [EP48].</p> <p>Estadísticas: Demartini, J. et al. [EP28], Gómez, E. [EP31], Diulio, M. [EP32], López Hernández, N. et al. [EP33], Agatón, A. et al. [EP34], Espinoza Correa, J. et al. [EP38], Arroyave Rojas, J. [EP39], Notaro, V. et al. [EP41], Yie Ru, C. et al. [EP45], Yie Ru, C. et al. [EP46], Jia, R. et al. [EP47].</p> <p>Herramientas: Pacheco Montes, M. [EP19], Rojas Valencia, M. et al. [EP35].</p> <p>Procesos: Duque Bonilla et al. [EP04], Brignoli, D. [EP29], Gómez E. [EP31].</p> <p>Ingeniería Civil: Estupiñán Perdomo, J. et al. [EP01], Salinas López, J. et al. [EP15], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Lossio Aricoché, M. [EP24], Bocanegra Gamarra, C. [EP25], Demartini, J. et al. [EP28], Saposnik, S. et al. [EP30], Gómez, E. [EP31], Diulio, M. [EP32], López Hernández, N. et al. [EP33], Agatón, A. et al. [EP34], Betasolo, M. et al. [EP42].</p> <p>Concientización: Gómez Orozco, J. et al. [EP08], Castro Vanoye, P. [EP09], Arengas Reinés, M. [EP10], Santamarta Cereza, J. [EP12], Pacheco Montes, M. [EP19], Demartini, J. et al. [EP28], Saposnik, S. et al. [EP30], Diulio, M. [EP32], Agatón, A. et al. [EP34], Notaro, V. et al. [EP41].</p> <p>Electrónica: Carvajal, G. et al. [EP02], Arengas Reinés, M. [EP10].</p> <p>Ingeniería Hidráulica: Carvajal, G. et al. [EP02], Vera Mercado, E. et al. [EP07], Salinas López, J. et al. [EP15], Ghimire, S. et al. [EP43], Yie Ru, C. et al. [EP45], Yie Ru, C. et al. [EP46].</p> <p>Ingeniería Electromecánica: Diomar, A. [EP03], Hernández García, E. [EP05], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Ghimire, S. et al. [EP43].</p> <p>Ciencias Ambientales: Gómez Orozco, J. et al. [EP08], Castro Vanoye, P. [EP09], Palacio Castañeda, N. [EP11], Guyot-Téphany, J. et al. [EP21], Ramírez Arcila, H. et al. [EP27].</p> <p>Ingeniería Industrial: Carvajal, G. et al. [EP02], Nara, F. et al. [EP26].</p> <p>Arquitectura: Berardi, R. [EP36], Rey, G. et al. [EP37].</p> <p>Otros: Vera Mercado, E. et al. [EP07], Suárez, A. et al. [EP22].</p> <p>No informa: Cruz Martínez, A. et al. [EP13], Chino Calli, M. [EP14], Arboleda Montañoi, N. [EP17], Pérez Hernández, A. et al. [EP20], Sandoval Betancourth, G. [EP23], Férrez Martínez, M. [EP40], Reitano R. [EP44], Colom Reyes, M. et al. [EP48].</p>
<p>PI5: ¿Cuáles son los principales usos del agua de lluvia recolectada?</p>	<p>Lavado de Ropa: Arboleda Montañoi, N. [EP17], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Gómez, E. [EP31], Jia, R. et al. [EP47].</p> <p>Lavado de Autos: Estupiñán Perdomo, J. et al. [EP01], Reyes Escobar, et al. [EP06], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Gómez, E. [EP31].</p> <p>Aseo de superficies: Estupiñán Perdomo, J. et al. [EP01], Duque Bonilla, et al. [EP04], Reyes Escobar, et al. [EP06], Gómez Orozco, J. et al. [EP08], Castro Vanoye, P. [EP09], Palacio Castañeda, N. [EP11], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Suárez, A. et al. [EP22], Sandoval Betancourth, G. [EP23], Bocanegra Gamarra, C. [EP25], Ramírez Arcila, H. et al. [EP27], Diulio, M. [EP32], Agatón, A. et al. [EP34], Berardi, R. [EP36], Arroyave, Rojas J. [EP39].</p> <p>Riego como actividad secundaria: Estupiñán Perdomo, J. et al. [EP01], Diomar, A. [EP03], Duque Bonilla, J. et al. [EP04], Reyes Escobar, et al. [EP06], Gómez Orozco, J. et al. [EP08], Castro Vanoye, P. [EP09], Palacio Castañeda, N. [EP11], Cruz Martínez, A. et al. [EP13], Salinas López, J. et al. [EP15], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Suárez, A. et al. [EP22], Sandoval Betancourth, G. [EP23], Bocanegra Gamarra, C. [EP25], Gómez, E. [EP31], Berardi, R. [EP36], Rey, G. et al. [EP37], Jia, R. et al. [EP47].</p> <p>Descarga de sanitarios: Estupiñán Perdomo, J. et al. [EP01], Diomar, A. [EP03], Duque Bonilla, J. et al. [EP04], Reyes Escobar, et al. [EP06], Vera Mercado, E. et al. [EP07], Gómez Orozco, J. et al. [EP08], Castro Vanoye, P. [EP09], Arengas Reinés, M. [EP10], Palacio Castañeda, N. [EP11], Salinas López, J. et al. [EP15], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Suárez, A. et al. [EP22], Sandoval Betancourth, G. [EP23], Lossio Aricoché, M. [EP24], Bocanegra Gamarra, C. [EP25], Nara, F. et al. [EP26], Ramírez Arcila, H. et al. [EP27], Demartini, J. et al. [EP28], Gómez, E. [EP31], Diulio, M. [EP32], Agatón, A. et al. [EP34], Berardi, R. [EP36], Rey, G. et al. [EP37], Arroyave Rojas, J. [EP39], Notaro, V. et al. [EP41], Ghimire, S. et al. [EP43], Jia, R. et al. [EP47], Colom Reyes, M. et al. [EP48].</p> <p>Consumo humano: Carvajal G. et al. [EP02], Santamarta Cereza J. [EP12], Chino Calli M. [EP14], Arboleda Montañoi N. [EP17], Pérez Hernández A et al. [EP20], Brignoli D. [EP29], Rojas Valencia M. et al. [EP35].</p> <p>Ducha: Rojas Valencia M. et al. [EP35].</p> <p>Incendio: Demartini J. et al. [EP28], Agatón A. et al. [EP34].</p> <p>Todo uso: Hernández García E. [EP05], Guyot-Téphany J. et al. [EP21], Lossio Aricoché M. [EP24], Nara F. et al. [EP26], Saposnik S. et al. [EP30], Reitano R. [EP44].</p> <p>Otros: Arboleda Montañoi N. [EP17], Jia R. et al. [EP47].</p> <p>No informa: Pacheco Montes M. [EP19], Espinoza Correa J. et al. [EP38], Férrez Martínez M. [EP40], Yie Ru C. et al. [EP45], Yie Ru C. et al. [EP46].</p>
<p>PI6: ¿Cuáles son los tipos de investigación de los artículos?</p>	<p>Propuesta de solución: Estupiñán Perdomo, J. et al. [EP01], Carvajal, G. et al. [EP02], Diomar, A. [EP03], Duque Bonilla, et al. [EP04], Hernández García, E. [EP05], Reyes Escobar, et al. [EP06], Vera Mercado, E. et al. [EP07], Gómez Orozco, J. et al. [EP08], Castro Vanoye, P. [EP09], Arengas Reinés, M. [EP10], Palacio Castañeda, N. [EP11], Santamarta Cereza, J. [EP12], Chino Calli, M. [EP14], Salinas López, J. et al. [EP15], Herrera Monroy, L. et al. [EP16], Mejía Piña, G. et al. [EP18], Pérez Hernández, A. et al. [EP20], Guyot-Téphany, J. et al. [EP21], Suárez, A. et al. [EP22], Lossio Aricoché, M. [EP24], Nara, F. et al. [EP26], Ramírez Arcila, H. et al. [EP27], Demartini, J. et al. [EP28], Brignoli, D. [EP29], Saposnik, S. et al. [EP30], Gómez, E. [EP31], Diulio, M. [EP32], López Hernández, N. et al. [EP33], Agatón, A. et al. [EP34], Rojas Valencia, M. et al. [EP35], Berardi, R. [EP36], Rey, G. et al. [EP37], Espinoza Correa, J. et al. [EP38], Betasolo, M. et al. [EP42], Jia, R. et al. [EP47], Colom Reyes, M. et al. [EP48].</p> <p>Opinión personal: Bocanegra Gamarra, C. [EP25].</p>

Filosófico: Férez Martínez, M. [EP40], Reitano, R. [EP44].

Validación: Pacheco Montes, M. [EP19], Arroyave Rojas, J. [EP39], Notaro, V. et al. [EP41], Ghimire, S. et al. [EP43], Yie Ru, C. et al. [EP46].

Evaluación: Cruz Martínez, A. et al. [EP13], Arboleda Montañoi, N. [EP17], Sandoval Betancourth, G. [EP23], Yie Ru, C. et al. [EP45].

Además de presentar la respuesta a la pregunta de investigación (PI6) en la Tabla 11, se presenta una síntesis narrativa de los tipos de investigación realizados en cada uno de los estudios primarios.

1. Del total de los estudios primarios analizados, treinta y seis corresponden al tipo de investigación *Propuesta de solución*.

- En [EP01] se presenta una propuesta de los requerimientos de infraestructura para el aprovechamiento sostenible del agua lluvia, en su solución se considera el estudio del caso del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá.
- En [EP02] se propone un prototipo sistema automatizado de recolección de agua lluvia doméstico que incluye un análisis de costos y factibilidad de la ejecución del proyecto.
- En [EP03] se presenta un sistema automático para el aprovechamiento del agua lluvia y el agua residual de la lavadora, la solución presenta análisis de los tipos de materiales que son convenientes utilizar en el desarrollo del sistema.
- En [EP04] se presenta la factibilidad económica, financiera y legislativa de un sistema de captación, recolección y reutilización de agua pluvial aplicable en las instituciones educativas básicas en la ciudad de Pereira, Colombia; además se realiza un estudio de mercado y un análisis de la demanda y ahorro de agua.
- En [EP05] se propone el diseño de un atrapaniebla utilizando la tecnología para optimizar la captación de agua de neblina; el desarrollo electrónico se realiza con Arduino, sensores de temperatura y humedad, aplicable en la parte nororiental de Puebla, México.
- En [EP06] la solución consiste en el diseño de un sistema de recolección de agua de lluvia para la planta Malher, Guatemala, Zona 12.
- En [EP07] se realiza una evaluación del uso racional de agua y energía en una institución educativa; mediante un análisis de costos y el retorno sobre la inversión (ROI).
- En [EP08] se presenta la viabilidad financiera y beneficios ambientales de sistemas de aprovechamiento de agua no convencionales en la zona urbana de Pereira, Colombia; se propone un sistema global de utilización de agua no convencional en una ciudad mediante revisión documental e inventario de materiales.
- En [EP09] se presenta una propuesta de los requerimientos de infraestructura para uso de agua gris y agua pluvial en desarrollos urbanos de alto poder adquisitivo en México, se arriba a la conclusión que, por la cantidad de agua captada, solamente alcanza para ser utilizada en riego.
- En [EP10] se propone un estudio de pre-factibilidad para el montaje de una empresa dedicada a la venta de sistemas de aprovechamiento de aguas de lluvia en el sector químico, agroindustrial y residencial de Bogotá D.C.
- En [EP11] se presenta una propuesta de un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias de bajo costo, fácil implementación y mantenimiento, como alternativa para el ahorro de agua potable, la disminución de los gastos debidos al consumo y un uso eficiente del recurso, en la Institución Educativa María Auxiliadora del municipio de Caldas, Antioquia, Colombia.
- En [EP12] se presenta un estudio de los fundamentos y propuesta de tecnologías para la captación y uso del agua procedente de la lluvia horizontal generada por la niebla en los Montes Canarios, España.
- En [EP14] se presenta una propuesta de captación de agua de lluvia en cobertura de viviendas rurales para consumo humano en la comunidad de Vilca Maquera, Puno, Perú, determinando que el agua captada en una superficie de 120 m² es suficiente para cubrir los requerimientos de agua de la población y los parámetros de la calidad de agua están dentro de los niveles permitidos por los estándares nacionales de calidad ambiental.
- En [EP15] se presenta una propuesta de evaluación de un sistema de captación de agua de lluvia en la zona metropolitana de Monterrey, México, para su aprovechamiento como medio alternativo; la propuesta de recupero de lluvia, se enfoca en el cálculo de ahorro de agua.

- En [EP16] se presenta un estudio de alternativas, para el uso sustentable del agua de lluvia. El objetivo general de la presente investigación es evaluar la implementación de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) en pequeña escala (techumbres) en la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM).
- En [EP18] se propone un sistema para reciclado, control y utilización de agua lluvia en la ciudad de Cuenca.
- En [EP20] se presenta una propuesta de recolección de agua de lluvia para consumo humano y uso doméstico en San Miguel Tulancingo, Oaxaca, mediante la creación y utilización de una microcuenca para abastecer de agua de lluvia a una ciudad.
- En [EP21] se propone un informe sobre la situación actual de las islas Galápagos, cuyo objetivo fue analizar cómo el proceso de apertura geográfica afecta la relación que los habitantes del archipiélago mantienen con el agua, indicando las acciones a realizar para mejorar la relación del hombre con la misma.
- En [EP22] se presenta la evaluación de un sistema de filtros de cascarilla de arroz y luffa-cylíndrica para el tratamiento de aguas de lluvias. Se evaluó un sistema de tratamiento para agua lluvia cosechada en los techos de la Universidad Libre, sede Bosque Popular, México empleando elementos lignocelulósicos mediante dos filtros de flujo descendente con lecho profundo.
- En [EP24] se presenta un sistema de abastecimiento de agua potable para cuatro poblados rurales del Distrito de Lancones, Perú en donde se implementó un sistema de agua potable por bombeo utilizando energía fotovoltaica (paneles solares) y abastecimiento a través de piletas públicas (39 en total).
- En [EP26] se presenta un estudio de la aplicación de la implementación de un sistema de recolección de agua de lluvia para usos domiciliarios y comerciales en el AMBA o Área Metropolitana de Buenos Aires.
- En [EP27] se presenta la evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia.; este estudio está dirigido a un análisis químico de la calidad de agua.
- En [EP28] se presenta un sistema de recolección y reutilización de las aguas de lluvia en edificios como beneficio para las ciudades.
- En [EP29] se presenta un estudio de la calidad del agua de lluvia, para el consumo humano y productivo en Los Talas, partido de Berisso, Argentina.
- En [EP30] se presenta el diseño y adaptación tecnológica del retardador pluvial en las residencias de la ciudad de Santa Fe, Argentina, para combatir el riesgo hídrico al cual está sometido la ciudad.
- En [EP31] se presentan las estrategias de diseño ambientalmente consciente aplicado a una vivienda unifamiliar en Villa Garibaldi, Argentina, se plantea diseño de ingeniería y cálculos para ahorro de agua.
- En [EP32] se presenta el reacondicionamiento ambientalmente consciente de viviendas de baja densidad. El objetivo del estudio reinterpretar los modelos de gestión de agua, para trabajar en saneamiento y recuperación del recurso hídrico, teniendo en cuenta la participación de la comunidad.
- En [EP33] se presenta el diseño de sistemas de captación del agua de lluvia como alternativa de abastecimiento hídrico; para uso doméstico de un hogar de cuatro integrantes, para consumo humano en una institución educativa de mil personas y para el riego de *stevia rebaudiana* en un invernadero de media hectárea para luego comparar, el costo de la captación del agua de lluvia con el de extracción del subsuelo.
- En [EP34] se presenta la revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos.
- En [EP35] se presenta la implementación y caracterización de un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia adicionando las ventajas de ahorro de energía, ya que se evita todo el proceso de extracción, sistema de distribución y bombeo para su transporte al área de suministro y el tratamiento requerido para garantizar la calidad adecuada para el consumo humano.
- En [EP36] se presentan medidas de reacondicionamiento de viviendas de baja densidad para un hábitat tendiente a la sustentabilidad en una vivienda de la ciudad de Gonnet, Argentina; se menciona la captación de agua y la metodología de cálculo para dimensionar tanques y el promedio mensual de consumo en vivienda.
- En [EP37] se presenta un estudio de adaptación de una vivienda pro.cre.ar a una vivienda bioclimática en la ciudad de Rauch, Provincia de Buenos Aires. El estudio se enfoca en cómo hacer una casa sustentable y analiza la captación de agua, y aplica datos y fórmulas para determinar el uso.

- En [EP38] se presenta un sistema de captación de agua de lluvia para uso doméstico en la Isla Jambelí, Cantón Santa Rosa, Ecuador. El estudio detalla en las lluvias y el ahorro que estas producen. Informa como dimensionar el tanque de almacenamiento y mejora la calidad del agua mezclándola con cloro.
- En [EP42] se presenta un proceso de diseño axiomático de un modelo de prototipo de infraestructura de captación de agua de lluvia. Esta presentación abstracta abordará los problemas derivados de la escasez de suministro de agua debido al cambio climático, la creciente demanda de la población urbana, los recursos hídricos limitados y la falta de acceso para suministrar agua a las comunidades rurales de Papúa Nueva Guinea.
- En [EP47] se presenta un estudio sobre estimación de valor, recolección y utilización de recursos de agua de lluvia en ciudades del norte de China. En la investigación se estima el valor de los recursos de agua de lluvia tomando la ciudad de Xi'an como un caso con el propósito de proporcionar una base teórica y práctica para la utilización de los recursos de agua de lluvia de la ciudad.
- En [EP48] se presenta un estudio sobre recolección de agua de lluvia para uso doméstico para resolver el problema de la pérdida durante las actividades diarias en el hogar, mediante la implementación de un modelo matemático, que tenga un área de captación, se puede observar claramente en qué aspectos se puede utilizar el agua de lluvia.

2. Del tipo de investigación *Filosófico* se encontraron dos estudios primarios

- En [EP40] se presenta un estudio de acopio de agua de lluvia en la cuenca del Mar Menor, España; se realiza un análisis de cómo hacen distintas viviendas de una población para acopiar agua de lluvia en aljibes y los tipos de aljibes disponibles.
- En [EP44] se presenta un sistema de recolección y almacenamiento de agua en el área mediterránea de Malta; la investigación ayuda a comprender los diferentes enfoques en cada país, como resultado de las condiciones climáticas, geográficas, socioeconómicas y culturales, así como los relacionados con la planificación espacial y el desarrollo urbano.

3. Dentro del tipo de investigación correspondiente a *Validación* se analizaron cinco estudios primarios.

- En [EP19] se presenta una propuesta de gestión integral del agua lluvia (GIALL), explorando el caso de las contribuciones al consumo sostenible del agua en el Estado de México.
- En [EP39] se presenta la evaluación económica de la captación de agua lluvia como fuente alternativa de recurso hídrico en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia.
- En [EP41] se presenta un análisis de fiabilidad de los sistemas de captación de agua de lluvia en el sur de Italia. El estudio realiza una descripción de la situación actual del agua en Italia y realiza cálculos para obtener los almacenamientos en base a la lluvia.
- En [EP43] se presenta la evaluación del ciclo de vida de un sistema comercial de recolección de agua de lluvia en comparación con un sistema municipal de suministro de agua.
- En [EP46] se presenta un sistema de soporte de decisiones basado en simulación hidráulica SIG y análisis económico para el diseño de captación de agua de lluvia. Los sistemas de recolección de agua de lluvia (RWHS) son cada vez más importantes para mejorar la disponibilidad de los recursos hídricos en todo el mundo. Este estudio establece un sistema de soporte de decisiones (DSS) basado en SIG que incorpora simulación hidráulica y análisis económico, y utiliza los RWHS de la azotea en la ciudad de Taipei, Taiwán como estudio de caso.

4. Del total de estudios, solo cuatro corresponden al tipo de investigación *Evaluación*.

- En [EP13] se presenta una propuesta de captación de agua de lluvia y retención de humedad edáfica en el establecimiento de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L) en un sistema de microcuencas captadoras de agua de lluvia.
- En [EP17] se presenta el diagnóstico del sistema de aprovechamiento del agua lluvia en el consejo comunitario de Los Lagos Buenaventura, Colombia capturando el agua en techos de zinc y almacenándola en baldes y bidones.
- En [EP23] se presenta un informe sobre ventajas económicas del aprovechamiento del agua lluvia, en el cual se aborda el problema que enfrenta la ciudad de Bogotá ante el cambio climático.

- En [EP45] se presenta la aplicación de un sistema de diseño de captación de agua de lluvia basado en el esquema SIG que incorpora tecnologías espaciales simulación hidráulica y viabilidad económica para explorar cómo los sistemas de captación de agua de lluvia (RWHS) pueden ser una herramienta rentable en la energía hídrica urbana planificación de la conservación. Su aplicación se realizó en las laderas de Taipei, Taiwán.
5. Solo un estudio primario corresponde al tipo *Opinión personal*.
- En [EP25] se presenta el diseño de sistema piloto de almacenamiento de agua lluvia a escala laboratorio en la sede Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena.
6. De los estudios primarios analizados, ninguno corresponde al tipo de investigación *Experiencia personal*.

3.1 Amenazas a la validez

En esta sección se analizan las potenciales amenazas que podrían afectar la validez del SMS, para este análisis se tuvieron en cuenta las categorías sugeridas por Wohlin en [10]:

- *Validez de constructo*. En este SMS, con el propósito de mitigar estas amenazas, se describió el significado de cada una de las categorías utilizadas en las dimensiones definidas en el esquema de clasificación definido en la planificación del SMS.
- *Validez interna*. Para mitigar los problemas de validez interna, se creó el protocolo de revisión como parte del proceso de investigación de esta investigación y éste ha sido revisado por la directora del proyecto.
- *Validez externa*. Se decidió en consenso con la directora del proyecto, utilizar las librerías digitales IEEE Xplore y ACM por encontrarse disponibles en la Universidad, así como también utilizar repositorios y plataformas en abierto como SEDICI, Google Academic, ScienceDirect, Scielo las cuentan con artículos de la disciplina Ciencias de la Computación. Se consideró la búsqueda de artículos de revistas y de actas de congresos. De la literatura gris, solo se consideraron las tesis dado que atraviesan un proceso de evaluación por un jurado conformado por expertos, se excluyen los artículos de los cuales solo se encuentra disponible el resumen, presentaciones de Power point o libros, porque su inclusión podría afectar la validez de los resultados.
- *Fiabilidad*. Para mitigar el sesgo de publicación, en el protocolo de revisión, se definieron cuidadosamente: a) los criterios de inclusión para la selección de estudios primarios, y b) los criterios de exclusión, intentando de seleccionar reglas en este trabajo, en base a las preguntas de investigación predefinidas. Para aumentar la confiabilidad, los investigadores en formación aplicaron los criterios con la ayuda de la directora del proyecto cada vez que se presentaba algún desacuerdo con respecto a la inclusión o exclusión de una regla. Paralelamente, la investigadora formada replicó el proceso de selección y se obtuvo un segundo conjunto de estudios primarios. Los dos conjuntos de estudios primarios fueron validados por los investigadores en formación, la directora y la investigadora formada; se discutieron las discrepancias entre ellos, con el propósito de determinar si era apropiado incluir un artículo en particular o no, y de ese modo se obtuvo el listado final de estudios primarios. Además, se diseñó un formulario para la registración de los datos con Excel y se mapearon las preguntas de investigación de acuerdo con el esquema de clasificación definido para cumplir con los objetivos de este estudio. Se considera que el efecto potencial de este sesgo tiene menos importancia en estudios de mapeos sistemáticos que en las revisiones sistemáticas de literatura. Para corroborar aún más el proceso de búsqueda, se aplicó el método *snowballing*, pero desafortunadamente no permitió encontrar más estudios primarios que los hallados en la búsqueda inicial.

4. CONCLUSIONES

Este capítulo presenta los resultados del SMS realizado con el propósito de analizar la literatura existente sobre la captación de agua de lluvia como alternativa de sostenibilidad del uso del agua potable. Se seleccionaron 48 estudios primarios relevantes de un conjunto inicial de 82 artículos resultantes de la búsqueda realizada en IEEE Xplore, ACM, Google Academic, ScienceDirect, SEDICI, Dialnet, Scielo en el período comprendido entre el año 2008 y 2018. Una vez analizados los estudios primarios, se concluye que:

- Las propuestas de captación de agua de lluvia presentan soluciones para campus universitarios y viviendas familiares en su gran mayoría y en un segundo lugar para desarrollos rurales, plantas industriales y comercios.
- Respecto a los países que presentan soluciones de uso como alternativa al agua potable se encuentran Colombia, México, Argentina Perú, Ecuador, Guatemala, España, Italia, Taiwán, China y Papúa Nueva Guinea.
- La mayoría de las soluciones destinadas a campus universitarios se observan en Colombia, y en segundo lugar en México.

- Algunos estudios se focalizan en los aspectos económicos asociados al uso del agua (análisis de costo-beneficio) y en otros en los aspectos ingenieriles para la construcción de los sistemas de captación de agua de lluvia.
- Se destaca el aprovechamiento del agua procedente de la niebla para la construcción de las soluciones.
- De los estudios primarios analizados, el 75 % (36 estudios) corresponden al tipo de investigación *propuesta de solución*.

Luego de analizar la literatura existente, como objetivo a largo plazo se propone la construcción de un sistema de gestión de captación de agua de lluvia para descarga de sanitarios en una estación de servicio de la Argentina. Nuestro trabajo futuro consiste en desarrollar la especificación de los requerimientos para el diseño del sistema, y luego continuar la construcción de los modelos conceptuales necesarios para el mismo.

REFERENCIAS

- [1] ONU. (2015). Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 - Agua Limpia y Saneamiento.
- [2] Herrera, L. (2010). Estudio de alternativas, para el uso sustentable del agua de lluvia. Trabajo de Grado. Instituto Politécnico Nacional. México.
- [3] Ambientum. (2019). Portal profesional del medioambiente. Recuperado: <https://www.ambientum.com/category/ambientum>.
- [4] OMS. (2011). Guías para la calidad del consumo del agua de consumo humano. Ginebra, Suiza.
- [5] Robles, M. et al. (2015). Manejo sostenible del agua. Banco Interamericano de Desarrollo.
- [6] Mauleón, C. (2015). La energía del cambio. Recuperado: <http://www.laenergiadelcambio.com/como-esta-distribuida-el-agua-del-planeta>.
- [7] ONU. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenibles. Recuperado: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es>.
- [8] Kitchenham, B. Budgen D. y Brereton, P. (2015). Evidence-Based Software Engineering and Systematic Reviews. Chapman and Hall.
- [9] Petersen, K. et al. (2008). Systematic mapping studies in software engineering. In 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering. Bari, Italy.
- [10] Wieringa, R. et al. (2005). Requirements engineering paper classification and evaluation criteria: A proposal and a discussion. *Requir. Eng.* 11(1), 102-107.
- [11] Wohlin, C. (2014). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. In 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering. Ciudad Real, Spain.

Estrategias de priorización de requisitos no-funcionales en desarrollos ágiles de software: Un diagnóstico inicial

Julio Lopera
Sebastián Espinosa
Viviana Díaz
Liliana González-Palacio
María Clara Gómez-Álvarez
Universidad de Medellín
Colombia

Cada vez más los procesos de desarrollo de software se enfocan en la aplicación de metodologías ágiles, las cuales han mostrado ventajas ante los métodos tradicionales, ya que éstas se caracterizan por su flexibilidad y rápida adopción al cambio. Uno de sus beneficios se observa al momento de capturar los requisitos funcionales por medio de historias de usuario. A pesar de la acogida de las metodologías ágiles, se han evidenciado proyectos de software con problemas de calidad debido a la entrega rápida de funcionalidad, que menosprecia la identificación, priorización y la adecuada implementación de los requisitos no-funcionales. Dicha situación ha sido identificada e investigada, dando como resultado nuevas propuestas como lo son las Metodologías CEP, NORMAP, AHP, las cuales plantean diferentes técnicas para la elicitación, análisis, evaluación y priorización de requisitos no-funcionales. Otros autores proponen una extracción de los requisitos no-funcionales basados en los requisitos funcionales, estableciendo técnicas de priorización que identifican una relación entre ambos grupos de requisitos. El presente capítulo realiza una revisión sistemática de literatura (RSL), donde se analizan las metodologías propuestas en 15 artículos, se identifican los respectivos pasos a aplicar y el impacto que dichos métodos generan en los proyectos donde fueron aplicados.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria del desarrollo de software se busca generar productos con estándares de calidad y que cumplan las necesidades del usuario. Sin embargo, por la naturaleza de las metodologías ágiles generalmente se prioriza los requisitos funcionales (RF) en las fases tempranas del desarrollo, ya que estos entregan valor al usuario rápidamente. Esta práctica pone en segundo plano el cumplimiento de los requerimientos no-funcionales (RNF) generando riesgos en el proyecto de desarrollo. De ese modo, cuando en un proyecto de desarrollo no se estiman los RNF desde etapas iniciales, se puede incurrir en sobrecostos, uso de recursos adicionales y retrasos en la fecha de entrega del producto final, para garantizar que la solución sea segura, confiable, con procesos eficientes y sin defectos. Es el caso de una herramienta de intercambio de inteligencia del ejército de EE.UU. que tuvo un costo de \$2.7 billones de dólares, cuya evaluación no cumplió con los RNF y fue descartada, generando así una pérdida total y el fracaso del producto [1].

Además de esto, el mercado indica que más del 26% del presupuesto en TI de las empresas es dedicado a garantizar y comprobar la calidad del software [2]. Esta situación se origina en la falta de priorización de los requerimientos no-funcionales por parte de los usuarios, sumado a la utilización de metodologías de desarrollo ágiles de software que no dan el soporte necesario a la toma de decisiones sobre los requisitos de calidad. Adicionalmente, el uso de estas metodologías hace más compleja la identificación de los requisitos no-funcionales necesarios en los ciclos de desarrollo.

Por todo lo anterior este capítulo se orienta a una exploración de las estrategias, técnicas y métodos para la priorización de requisitos no-funcionales de los productos de software, tales como confiabilidad, seguridad, desempeño, entre otros. Esta exploración permitirá identificar aquellas propuestas que puedan ser aplicadas en el contexto empresarial en equipos de desarrollo de software ágil, así como aquellas que puedan ser incluidas en los currículos universitarios asociados a calidad de software e ingeniería de requisitos.

La estructura del capítulo se indica a continuación: en la Sección 2 se describe el protocolo de revisión sistemática de literatura (RSL) como mecanismo de selección y análisis de información; la Sección 3 describe los resultados de dicha revisión y finalmente en la Sección 4 se presentan las conclusiones y líneas de trabajo futuro derivadas de la presente investigación.

2. MÉTODO

El estudio exploratorio objeto de este trabajo se realizó siguiendo el protocolo propuesto por Kitchetham [3] para revisiones sistemáticas de literatura que se esquematiza en la Figura 1. Las preguntas de investigación (PI) definidas para el presente trabajo se indican a continuación:

- PI 1.** ¿Qué estrategias son usadas actualmente para determinar la priorización de los requerimientos no-funcionales en proyectos de desarrollo ágil?
- PI 2.** ¿Qué pasos describe las estrategias que son usadas para la priorización de requisitos no-funcionales en metodologías de desarrollo ágiles de software?

PI 3. ¿Qué impacto generan en los proyectos de desarrollo ágil la aplicación de técnicas de priorización de requisitos no-funcionales?

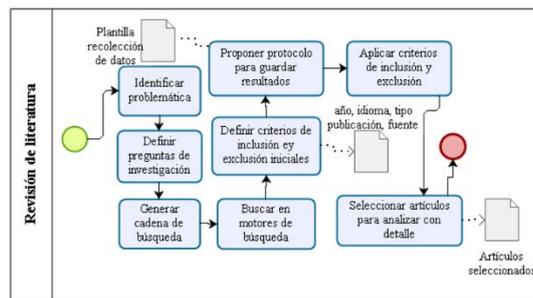


Figura 1. Actividades del protocolo de Revisión Sistemática de Literatura

La revisión sistemática se realizó en las bases de datos IEEE, ACM y SCOPUS. Además, se realizó una identificación inicial por medio del buscador Google Scholar. Se emplearon las cadenas de búsqueda mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Cadenas de búsqueda empleada en las bases de datos

Cadena	Cadenas generales de búsqueda
A	(Priorit* OR Classif*) AND (Techniques OR Procedures OR Methods Step by step techniques) AND (Non?Functional requirement? OR NFR OR Qualities Attributes) AND (Agile method* OR Agile Software Development Cycle OR ASD)
B	(Prioritization OR prioritize OR prioritizing OR Classification) AND (Techniques OR Procedures OR Methods) AND (Non?Functional requirement? OR NFR OR Qualities Attributes) AND (Agile method* OR Agile Software Development Cycle OR ASD)

La ejecución de las cadenas de búsqueda en las bases de datos arrojó los resultados presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Cantidad de artículos encontrados en las bases de datos

Cadena	Google Scholar	Scopus	ACM	IEEE
A	685	90	29	11
B	344	71	11	10

Posteriormente, se definieron los criterios de inclusión tales como: artículos de revista científica, artículos de conferencia, publicaciones desde 2010 hasta 2019, excluyendo los artículos que no fueran referentes a áreas de ciencias de la computación e ingeniería. También se seleccionaron sólo los artículos en idioma inglés. El resultado obtenido al aplicar los criterios mencionados sobre las cadenas de búsqueda se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Cantidad de artículos filtrados luego de aplicar los criterios de inclusión y exclusión

Cadena	Google Scholar	Scopus	ACM	IEEE
A	343	46	20	1
B	160	42	7	4

Luego se procedió a seleccionar un subconjunto de artículos, empleando criterios adicionales como su nivel de relevancia, y la posible respuesta a las preguntas de investigación planteadas y su aplicabilidad en los procesos de desarrollo de software de las empresas del sector (Tabla 4).

Tabla 4. Listado de artículos más relevantes para la revisión sistemática de literatura

	Título artículo	Año	Referencia
1	Requirements Prioritization Using Hierarchical Dependencies	2018	[4]
2	Determining Interdependencies among NFRs in Agile Environment to Reduce Conflicts	2018	[5]
3	Impact and challenges of requirements elicitation & prioritization in quality to agile process: Scrum as a case scenario	2017	[6]
4	Prioritizing non-functional requirements in agile software engineering	2017	[1]
5	Capturing, eliciting, and prioritizing (CEP) NFRs in agile software engineering	2017	[7]
6	ISM based identification of quality attributes for agile development	2016	[8]
7	Requirements Engineering For Eliciting Non Functional Requirements Using Sprints In Agile Environment	2016	[9]
8	Capturing, eliciting, predicting and prioritizing (CEPP) non-functional requirements metadata during the early stages of agile software development	2015	[10]
9	Applying analytical hierarchy process to system quality requirements prioritization	2015	[11]
10	An Approach for Prioritizing NFRs According to Their Relationship with FRs	2015	[12]
11	NORPLAN: Non-functional requirements planning for agile processes	2013	[13]
12	Visualization and scheduling of non-functional requirements for agile processes	2013	[14]
13	The Normap methodology: Lightweight engineering of non-functional requirements for agile processes	2012	[15]
14	Novel lightweight engineering artifacts for modeling non-functional requirements in agile processes	2012	[16]
15	AFFINE for Enforcing Earlier Consideration of NFRs and Human Factors When Building Socio-Technical Systems Following Agile Methodologies	2010	[17]

Una vez seleccionados los artículos se procedió a su lectura completa y la extracción de información por medio del instrumento que se muestra en la Tabla 5, con el fin de encontrar las respuestas a las preguntas de investigación planteadas, se muestran los ítems que componen el formulario y un ejemplo para el caso del artículo 5 [7].

Tabla 5. Formulario de extracción de información diligenciado para el artículo 5 [7]

Información General	
Título	Capturing, eliciting, and prioritizing (CEP) NFRs in agile software engineering
Autor/ año	R. R. Maiti & Mitropoulos/ 2017
Palabras clave	Agile Software Engineering, Capture Elicit Prioritize, CEP, Functional Requirements, Non-Functional Requirements, NFRs, FRs, NERV, NORMAP, NFRM, OCR
Base de Datos/Fuente	IEEE/ Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON
Fecha de revisión	2020/04/05
DOI	10.1109/SECON.2017.7925365
Resultados Objetivos	
Pregunta de investigación #1	
1.1 Tipo de investigación	Teórica (x) Empírica Experimental
1.2. Tipo y nombre de la estrategia	Practice Method Methodology (CEP Methodology) Model Framework Advise Tool Guidelines
1.3. Descripción	Metodología Capturar Elicitar Priorizar (CEP): Desarrollar un framework automatizado para RNF desde documentos de requisitos y diagramas/imágenes contenidas en los documentos. Herramienta: OCR (<i>Optical character recognition</i>) junto con localizador de RNF utilizando el Parser de Lenguaje Natural de Stanford (NLP) para extraer oraciones de RNF desde documentos e imágenes caracterizándolos en categorías de RNF.
1.4. RNF estudiados	¿Es un estudio para RNF genéricos? SI ¿Esta investigación aborda RNF específicos? NO Si la respuesta es SI, especifica cuáles: N/A
1.5. Artefactos usados	OCR, Chung's NFR framework, $\alpha\beta$ -framework, NFR Locator Plus tool
1.6. Propósito	Este artículo propone un mecanismo para incorporar OCR para capturar y elicitar RNF desde documentos digitales e imágenes.
Pregunta de investigación #2	
2.1. Pasos a aplicar	
Capturar: El artefacto usado para capturar RNF es OCR. Los textos extraídos son usados para elicitar RNF. Elicitar: Las categorías de RNF categorizan un grupo de RNF basados en el framework Chung's NFR. El localizador de RNF categoriza los RNF en categorías seleccionados usando el algoritmo de clasificación k-NN. Priorizar: Se asignan números a cada RNF que se traducen en un peso (Ejemplo: RNF con peso de 1 tiene más prioridad que un requisito con un peso de 5). El $\alpha\beta$ -framework es utilizado para priorizar los RNF donde α es el requisito priorizado subjetivamente y β es la priorización del requisito usando el método gana-gana.	
2.2. Roles involucrados	Miembros del equipo ágil
2.3 Figuras adicionales	N/A
Pregunta de investigación #3	
3.1. Beneficios encontrados	
1. Carga rápida del documento de requisitos. 2. Identificar los RNF al inicio del ciclo del software es crucial en el desarrollo de software balanceado. Los RNF son encontrados en imágenes y documentos al inicio del proceso de desarrollo de software. 3. La metodología CEP aplica tecnología OCE para identificar y vincular metadatos con requisitos funcionales y no-funcionales. 4. La metodología CEP fue exitosa en la identificación de RNF en oraciones con un resultado de 98.24% 5. El NFRL+ utiliza grupos de datos de entrenamiento para localizar RNF en documentos de requisitos. 6. El NFRL+ fue entrenado para reconocer lenguajes diferentes al inglés. 7. Mejora la recolección de RNF y reduce el número de falsos positivos. 8. Obtención de hallazgos desde imágenes y figuras.	
3.2. Retos identificados	
1. OCR puede ser mejorado para reconocer texto escrito a mano de tarjetas usadas en XP. 2. Otra área de mejora es utilizar el NFRL+ en múltiples grupos de datos previamente almacenados. 3. Expandir las categorías de RNF. Las categorías base fueron usadas en el Chung's NFR framework. 4. Asociar cada imagen o figura al requisito correspondiente.	
3.3. Método de evaluación	Experimento Caso de estudio (x) Simulación Evaluación en proyecto real
Resultados subjetivos	
Esta herramienta es muy precisa y usa tecnología avanzada con artefactos automatizados para capturar requisitos. El método de priorización se basa en el $\alpha\beta$ -framework. Este estudio no muestra resultados aplicando la metodología propuesta en un proyecto de software real.	

Como estrategia complementaria, se propusieron siete criterios de comparación de los resultados obtenidos. La descripción y el tipo de respuesta de cada uno se explican en la Tabla 6.

Tabla 6. Criterios de comparación

Descripción	Tipo de Respuesta
1 Tipo de investigación	Teórica/Empírico/Experimental
2 Tipo de estrategia	Practica/Método/Modelo/Framework/Recomendación/Herramienta/Pauta
3 ¿Están claramente definidos los pasos de la estrategia?	Si/No
4 ¿La estrategia fue aplicada en un entorno real?	Si/No
5 ¿Son los pasos propuestos fáciles de aplicar en proyectos reales?	Si/No

6	Tipo de validación de la estrategia	Experimento/Casos de estudio/Simulación/Evaluación de un proyecto real.
7	Tipo de impacto	Reducción de conflicto/Incremento en la calidad de requerimientos no-funcionales/Reducción de tiempos/Pragmatismo/Precisión-Automatización/Visualización.

Por otra parte, en la Tabla 7 se presenta el análisis de una muestra representativa de los artículos seleccionados a la luz de los criterios propuestos.

Tabla 7. Criterios de comparación evaluación de los criterios de comparación de los estudios seleccionados.

Ref.	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Criterio 6	Criterio 7
[4]	Teórica- Experimental	Método	Si	No	Si	Experimento	Reducción de conflicto
[5]	Teórica	Framework	Si	No	Si	Caso de estudio	Reducción de conflicto
[6]	Teórica- Experimental	Modelo	Si	No	Si	Simulación	Incremento en la calidad de requerimiento no-funcionales
[1]	Teórica	Método	Si	No	Si	Simulación	Pragmatismo
[7]	Teórica	Metodología	Si	No	Si	Caso de estudio	Precisión-Automatización
[8]	Teórica	Metodología	Si	No	No	No fue evaluado	Reducción de conflicto
[9]	Teórica	Método	Si	No	No	No fue evaluado	Reducción de conflicto
[10]	Teórica- Experimental	Metodología	Si	No	Si	Caso de estudio	Incremento en la calidad de requerimientos no-funcionales, reducción de tiempos
[11]	Teórica- Experimental	Practica	Si	Si	No	Caso de estudio	Pragmatismo
[12]	Teórica- Experimental	Framework	Si	No	Si	Simulación	Pragmatismo, Precisión-Automatización
[13]	Teórica	Metodología	Si	No	Si	Caso de estudio	Reducción de tiempos
[14]	Teórica- Experimental	Framework	Si	Si	Si	Caso de estudio	Reducción de tiempos
[15]	Teórica- Experimental	Metodología	Si	No	No	Caso de estudio	Reducción de tiempos, Incremento en la calidad de requerimiento no-funcionales
[16]	Teórica	Modelo	Si	No	No	Caso de estudio	Visualización
[17]	Teórica	Método	Si	No	Si	No fue evaluado	Reducción de conflicto

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Figura 2 muestra la distribución de los estudios seleccionados (15) por año de publicación entre 2010 y 2018. Se observa que el 66% de los artículos fueron publicados los pasados 5 años. Durante los años 2011 y 2014 no hay publicaciones relevantes. Los demás años cuentan con una distribución muy similar.

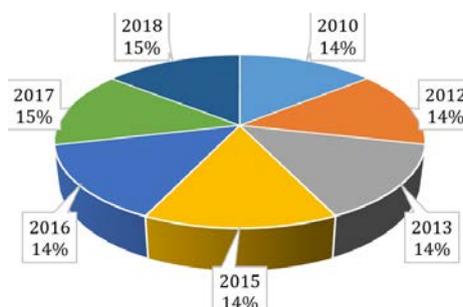


Figura 2. Distribución de estudios seleccionados con respecto al año de publicación

En la Figura 3 se observa la distribución de los artículos seleccionados acorde a la base de datos donde fueron publicados.

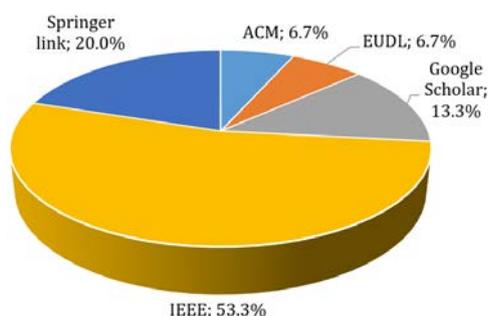


Figura 3. Distribución de estudios seleccionados con respecto a la base de datos de publicación

IEEE tiene el porcentaje más significativo, seguido por Springer. Este resultado evidencia la calidad de los artículos analizados ya que provienen de bases de datos donde sólo se aceptan publicaciones arbitradas sometidas a un riguroso proceso de evaluación.

3.1 Estrategias de priorización de los requisitos no-funcionales

Este apartado corresponde a la pregunta de investigación 1 relacionada con la identificación de estrategias de priorización de requisitos no-funcionales. Las estrategias más aplicadas para la priorización de requisitos en los artículos seccionados son: *Analytical Hierarchical Process (AHP)*; *Capturing, Eliciting and Prioritizing (CEP)* y la metodología *Non-functional Requirements Modeling for Agile Processes (NORMAP)*. AHP y NORMAP tienen igual porcentaje de uso (26.7%), y le sigue CEP. En la Figura 4 se observa la distribución de las estrategias usadas para la priorización de los requisitos en los artículos revisados.

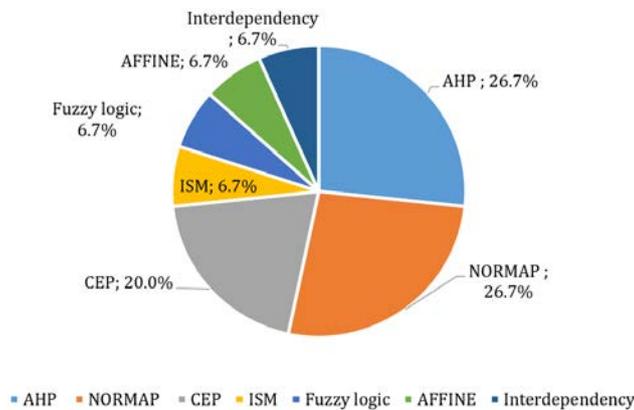


Figura 4. Distribución de las estrategias de priorización de requisitos no-funcionales en los estudios seleccionados.

Ahora vale la pena analizar qué tipo de artefacto o producto se ofrece en los artículos revisados. Es así como en la Figura 5 se indica si se entrega una metodología, método, *framework*, modelo o práctica.

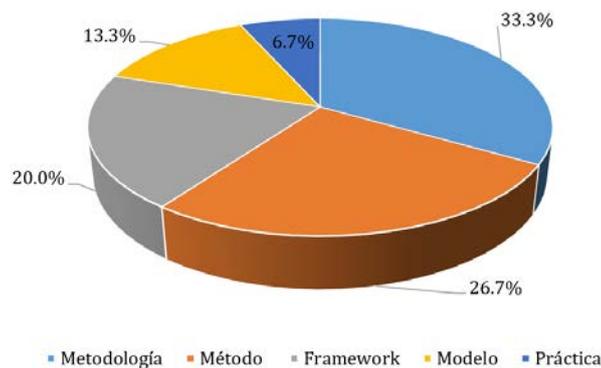


Figura 5. Tipo de artefacto en la muestra de estudios seleccionados

En la Figura anterior se evidencia que el 33.3% de los artículos revisados ofrecen metodologías completas para priorizar requisitos, seguido de los métodos. Este resultado favorece mucho los procesos de priorización, porque al tener metodologías completas de guía, el paso a paso será más riguroso y habrá menos improvisación por parte del equipo encargado de planificar, documentar e implementar requisitos no-funcionales en desarrollos de software.

Este resultado es compatible con el análisis hecho a partir de las Tablas 6 y 7, en relación con el tipo de investigación realizada. El criterio 1 indica que la totalidad de los estudios es de carácter teórico y un 47% de estos también es de tipo experimental, mientras que ningún estudio se identifica de tipo empírico.

Adicionalmente se identificaron 22 artefactos diferentes implementados en la muestra seleccionada. Por ejemplo, AHP prevalece como parte del proceso de los diferentes estudios seleccionados, los 3 artefactos (*Agile Loose Case ALC*, *Agile Choose Case ACC* y *Agile Use Case AUC*) propuestos por la metodología NORMAP y el algoritmo de riesgo propuesto por esta misma son los siguientes en la lista. *100 dollar test*, *$\alpha\beta\gamma$ -framework*, *Chung's framework*, *Optical Character Recognition (OCR)* y *W8 Story Card* son otros de los artefactos implementados durante los procesos propuestos en los diferentes estudios.

3.2 Pasos de las estrategias de priorización de los Requisitos no-funcionales

La segunda pregunta de investigación indaga sobre los pasos que componen la estrategia de priorización de requisitos no-funcionales (RNF). Por medio del criterio 3 de comparación descrito en la Tabla 7 se observa que la muestra revisada tiene establecidos pasos secuenciales para la aplicación de la estrategia de priorización de RNF. Dichos pasos son cuantificables y oscilan entre un mínimo de 2 pasos hasta un máximo de 6, con una media de 4 pasos. Algunos de los artículos indican aplicar todo o parte del proceso de AHP dentro de los pasos propuestos. Se obtiene un máximo

de 11 pasos y una media de 6 pasos, al incluir los pasos adicionales que propone el método AHP, los cuales son un total de 6 pasos adicionales [18]. En la Figura 6 se observan los artículos específicos que aplican este método [1, 4, 6, 9, 10].

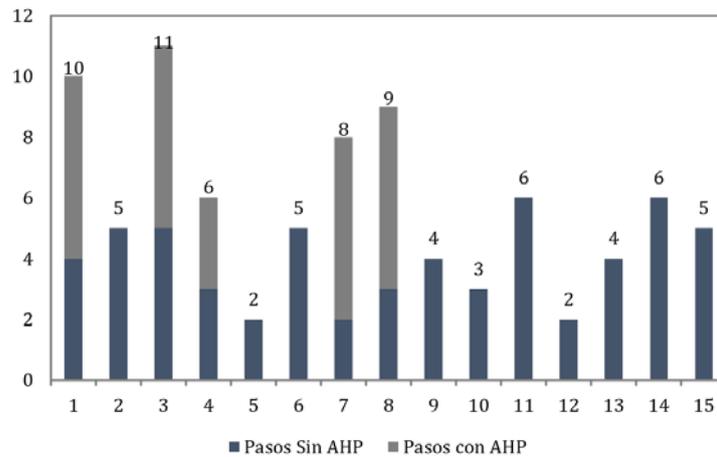


Figura 6. Cantidad de pasos definidos en los estudios seleccionados más representativos

Adicionalmente, se encontró que todos los artículos proponen alguna técnica para establecer el grado de importancia en los pasos del proceso. 50% de los artículos utilizan el criterio de valor del negocio o la técnica *win-win*, las cuales son evaluadas de forma subjetiva por los representantes del negocio: *stakeholders*, directivos y *product owner* [1, 4, 5, 7, 10, 11, 14, 17]. 26% de los artículos incluyen la técnica de prueba de los 100-dolares [1, 6, 7, 10] y de este porcentaje, el 90% incluye dicha prueba como complemento al criterio del valor del negocio, con el propósito de incentivar la decisión del cliente y motivar la selección de los requisitos más importantes [1, 7, 10]. Finalmente, el 26% de artículos no consideran el criterio técnico en sus pasos [1, 4, 7, 10].

Se observa dentro de los pasos propuestos por cada estudio que el 40% de los artículos evalúa la relación entre los requisitos funcionales (RF) y los no-funcionales (RNF), como parte del proceso para establecer el peso o la importancia [4, 5, 12, 15-17]. El artículo [12] propone la relación entre los RF y RNF como único criterio de entrada del modelo, para después aplicar la estrategia propuesta.

También vale la pena mencionar que 40% de los estudios analizados utiliza la comparación de importancia y dependencia entre los RNF, como parte del proceso para establecer el peso o importancia de cada uno de los RNF [4, 5, 8, 9, 11, 17]. Por ejemplo, en [8] se utiliza la comparación entre los RNF como único criterio de entrada del modelo. Dicho estudio establece una jerarquía de priorización basada en las dependencias, donde se determina el orden de ejecución de los RNF con más RNF que dependen de él y así sucesivamente hasta llegar al RNF de menor dependencia.

20% de los artículos proponen criterios cualitativos basados en comparaciones, dependencias e importancia para establecer la priorización [5, 8, 17]. 27% de los estudios revisados utilizan el cálculo basado en el análisis de riesgos para establecer la priorización de los RNF [13-17]. Propuestas que utilizan algún modelo matemático para apoyar el proceso de cálculo de prioridades representan el 53% de la muestra examinada. Esto se logra por medio de asignación de valores numéricos en los pasos predecesores a la aplicación del modelo [1, 4, 6, 7, 9-12]. Los estudios [5, 17] incluyen dentro de sus pasos la validación con el cliente y la necesidad de iterar nuevamente en el proceso en caso de no lograr un acuerdo. El artículo [4] incluye el costo relativo de hora/hombre del RNF, como uno de los criterios de evaluación para la priorización. Finalmente, en la Figura 7 se analizaron los roles involucrados dentro de los pasos de implementación de la estrategia.

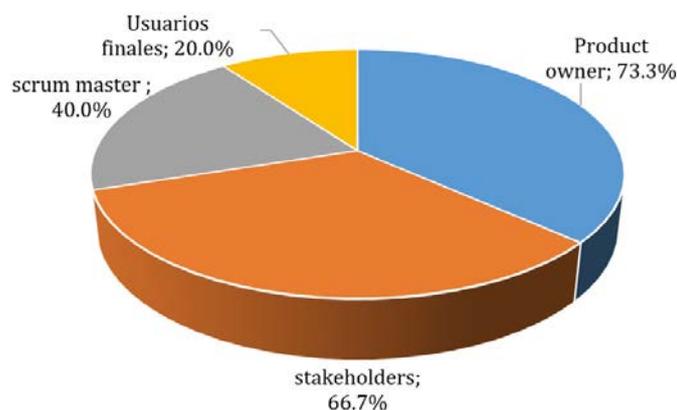


Figura 7. Roles involucrados en los artículos seleccionados

Se encontró que el 73.3% de las propuestas tienen en cuenta el equipo técnico: *product owner*, equipo de analistas, equipo de desarrolladores, equipo de pruebas, arquitecto de aplicaciones [4, 5, 10, 6-8, 17]. 66.7% tienen en cuenta el criterio de los *stakeholders* en los pasos establecidos para la priorización, la participación de dicho rol está en el paso de definición de la importancia para el negocio y la alineación con los objetivos de negocio [1, 4, 5, 6, 9-12, 14, 15, 17]. El gerente de proyecto o *scrum master* es elemento clave para el liderazgo del proceso [1, 4, 7, 13, 15, 17] en el 40% de los casos. Solo el 20% de propuestas tienen en cuenta el criterio de los usuarios finales del producto [4, 11, 17]. Bourimi *et al.* [17] proponen un nuevo rol definido como *NFR stakeholder*. Dicho rol se responsabiliza de garantizar el cumplimiento de los requisitos no-funcionales y de establecer la importancia de los RNF con relación al requisito funcional.

3.3 Impactos de las estrategias de priorización de los RNF

La pregunta de investigación 3 está asociada a explorar el impacto de las estrategias de priorización de requisitos no-funcionales. El criterio 6 de comparación de la Tabla 7, indica los diferentes métodos empleados por los autores para realizar la validación de las estrategias propuestas. En la Figura 8 se muestra que los métodos empleados son: casos de estudio, simulaciones y experimentos. Se observa que el 53% de los estudios emplea un caso de estudio para demostrar los resultados de la estrategia [5, 7, 11, 13-17]. Dichos casos de estudio son generalmente escenarios controlados que los autores proponen en un proyecto donde se obtiene una lista conocida de RNF y desarrollan la validación de la estrategia por medio de esta lista. Los artículos [1, 6, 12] que usan simulaciones, proponen un ejercicio de valores específicos y con dicho problema logran desarrollar la validación de la estrategia propuesta. El artículo [4] realiza un experimento para el proceso de validación. Por otro parte, solo el 20% de los artículos analizados no realiza ningún tipo de evaluación para la validación de su propuesta [8, 9, 17].



Figura 8. Distribución del tipo de validación de las estrategias de priorización de RNF

Asimismo, se observa los resultados obtenidos con el criterio 4 de comparación, que el 86% de los artículos (Tabla 7) no aplicó la estrategia de priorización en entornos reales, como la industria de desarrollo de software o afines. Por lo que los resultados enunciados por estos autores aún proporcionan una incertidumbre en términos de los impactos que podrían generar al ser implementados en un proyecto de desarrollo ágil real.

El criterio 7 de comparación en la Tabla 7 permite observar que dentro de los estudios seleccionados existen diferentes resultados que impactan principalmente en: la reducción de conflictos, la reducción de tiempos, el incremento en la calidad de los RNF, mayor pragmatismo, mayor precisión por medio de la automatización y mejora en la visualización de los RNF.

En la Figura 9 se destaca que el 33% de los artículos impactan en la reducción de conflictos entre el equipo técnico de desarrollo y los clientes, durante el proceso de capturar, evaluar, validar y comparar los requerimientos no-funcionales [4, 5, 8, 9, 17]. El 26% de los artículos impactan en la reducción de tiempos en los ciclos de desarrollo de software ágil [10, 13-15]. El 20% de los artículos impactan en el incremento en la calidad de RNF, si se contemplan desde etapas tempranas del ciclo de desarrollo de software ágil [6, 10, 15]. Finalmente, el 20% de los artículos impactan en el pragmatismo en cuanto a la aplicabilidad de la estrategia de priorización [1, 11, 12].

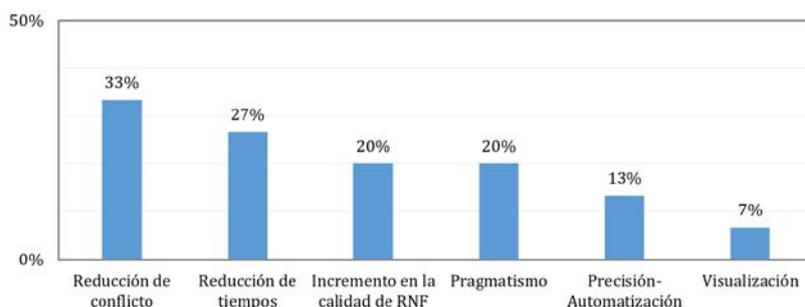


Figura 9. Distribución de estudios de acuerdo al tipo de impacto de las estrategias de priorización de RNF

4. CONCLUSIONES

Este capítulo proporciona el entendimiento del panorama de investigación alrededor de las estrategias planteadas para la priorización de los requisitos no-funcionales en entornos de desarrollos ágiles. La investigación que se llevó a cabo empleó la técnica de revisión sistemática de literatura, la cual ayuda a la identificación de las diferentes estrategias, los pasos propuestos y el impacto que dichas propuestas generan en los proyectos de desarrollos ágiles. Se establecen las siguientes observaciones a partir de la información detallada en las secciones anteriores:

- Se observa que las investigaciones seleccionadas son de carácter teórico experimental, a pesar del desarrollo de las diferentes metodologías con el paso del tiempo, estos estudios carecen de un proceso de aplicación práctico y orientado a la experimentación y validación de los resultados enunciados en entornos reales. Se resalta entonces como trabajo futuro el proceso de aplicación y validación de aquellas metodologías en procesos de desarrollos dentro de la industria de software. Finalmente se identifica una línea de trabajo donde se proponen validaciones por medio de simulaciones apoyadas en herramientas de testeado que proporcionarán una mejor calidad al producto de desarrollo.
- Se identifican y se clasifican las investigaciones en tres grandes grupos. El grupo 1 son aquellos estudios que tienen como base fundamental para el análisis de priorización el valor para el negocio y la alineación con los objetivos del negocio, y establecen la relevancia de los RNF con base al concepto otorgado por los *stakeholders* y finalmente complementan la toma de decisión por medio de criterios técnicos, comparaciones, identificación de dependencia o modelos matemáticos [1, 4-7, 10, 11, 14, 17]. El grupo 2 son aquellos estudios que priorizan los RNF basados en el riesgo que implica la implementación de los RNF específicos en una fase temprana o tardía del proceso de implementación, dicho riesgo es calculado por medio de algoritmos que tienen como datos de entrada las diferentes métricas de la gestión del proyecto, tanto las generales, del equipo de desarrollo, las tecnologías, el proceso como también las métricas de los requisitos de calidad [13-16]. Finalmente, el grupo 3 plantea la priorización de los RNF por medio de la relación entre los requisitos funcionales [8, 9].
- Mediante este análisis se observa las diferentes estrategias al momento de realizar la priorización de los RNF. Este proceso hace parte de todo el ciclo de captura, elicitación y priorización que conlleva luego a la planeación e implementación de los RNF y los RF dentro de los proyectos ágiles. Es claro que, al desarrollar las diferentes estrategias, cada proceso depende del grado de precisión con que se obtienen los requisitos. Por tal razón, siendo AHP un método propuesto ya varios años atrás, el grado de precisión que resulta de este método lo hace ser uno de los procesos más implementados y aún se encuentran estudios recientes que proponen modificaciones a dicha técnica.
- La metodología NORMAP es otra estrategia que plantea una priorización por medio de la implementación temprana de los requisitos no-funcionales más riesgosos. Dicha metodología fue estudiada por medio de los artículos [13-16] y presenta un paso a paso riguroso y muy prometedor, el cual amerita un trabajo futuro en términos de la aplicación de esta metodología en entornos reales, ya que esto permite perfeccionar la propuesta al identificar posibles problemas durante la adopción del método por los diferentes actores del proceso de desarrollo.
- En general, todos los estudios seleccionados resaltan la importancia de la identificación y priorización de los RNF en las etapas tempranas del proceso ágil, con el fin de reducir el riesgo de fracaso del producto. Sin embargo, teniendo en cuenta que el segundo principio de los doce principios ágiles dice: Aceptamos que los requisitos cambien, incluso en etapas tardías del desarrollo. Los procesos Ágiles aprovechan el cambio para proporcionar ventaja competitiva al cliente [19], se identifica que la propuesta de las estrategias, en los artículos estudiados, carecen de la inclusión de procedimientos para hacer seguimiento al proceso de implementación y adaptación a los cambios. Se propone como línea futura de investigación la revisión de la priorización durante el proceso de iteración de los proyectos con el fin de identificar nuevos RNF y evaluar el impacto de los cambios o evolución del proyecto sobre los RNF.

Como trabajo futuro, a partir de esta revisión de estrategias de priorización de requisitos no-funcionales, se plantean dos retos importantes: 1) Mayor difusión de estas estrategias a nivel académico y empresarial, y 2) Incluir este tipo de técnicas en proyectos ágiles en empresas de desarrollo de software mediante la formación de ingenieros de sistemas y la ejecución de proyectos piloto en asocio Universidad-Empresa dentro de los proyectos de aula de asignaturas de la línea de Ingeniería de Software.

REFERENCIAS

- [1] Maiti, R. y Mitropoulos, F. (2017). Prioritizing non-functional requirements in agile software engineering. En The SouthEast Conference. Kennessaw, USA.
- [2] Behutiye, W. et al. (2019). Management of quality requirements in agile and rapid software development: A systematic mapping study. Information and Software Technology 23, 345-356.

- [3] Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. Keele University.
- [4] Alawneh, L. (2018). Requirements prioritization using hierarchical dependencies. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 67, 234-245.
- [5] Ali, J., Shoukat, M. y Faisal, M. (2018). Determining Interdependencies among NFRs in Agile Environment to Reduce Conflicts. *EAI Endorsed Trans. Mobile Communications Applications*, 3(13), 26-35.
- [6] Asghar, A. et al. (2017). Impact and challenges of requirements elicitation & prioritization in quality to agile process: Scrum as a case scenario. En 2017 International Conference on Communication Technologies. Pakistán.
- [7] Maiti, R. y Mitropoulos, F. (2017). Capturing, eliciting, and prioritizing (CEP) NFRs in agile software engineering. En SoutheastCon 2017. Charlotte, USA.
- [8] Jain, P., Sharma, A. y Ahuja, L. (2016). ISM based identification of quality attributes for agile development. En 5th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization. Noida, India.
- [9] Gayathri, S. y Theetchenya, S. (2016). Requirements engineering for eliciting non-functional requirements using sprints in agile environment. *Journal of Recent Research in Engineering and Technology* 3(2), 1-8.
- [10] Maiti, R. y Mitropoulos, F. (2015). Capturing, eliciting, predicting and prioritizing (CEPP) non-functional requirements metadata during the early stages of agile software development. En SoutheastCon 2015. Fort Lauderdale, USA.
- [11] Kassab, M. y Kilicay, N. (2015). Applying analytical hierarchy process to system quality requirements prioritization. *Innovations in Systems and Software Engineering*, 11(4), 303-312.
- [12] Dabbagh, M. y Lee, S. (2015). An approach for prioritizing NFRs according to their relationship with FRs. *Lecture Notes on Software Engineering*, 3(1), 1-5.
- [13] Farid, W. y Mitropoulos, F. (2013). NORPLAN: Non-functional requirements planning for agile processes. En Southeastcon 2013. Jacksonville, USA.
- [14] Farid, W. y Mitropoulos, F. (2013). Visualization and scheduling of non-functional requirements for agile processes. En Southeastcon 2013. Jacksonville, USA.
- [15] Farid, W. (2012). The Normap methodology: Lightweight engineering of non-functional requirements for agile processes. En Asia-Pacific Software Engineering Conference APSEC 2012. Hong Kong, China.
- [16] Farid, W. y Mitropoulos, F. (2012). Novel lightweight engineering artifacts for modeling non-functional requirements in agile processes. En SoutheastCon 2012. Orlando, USA.
- [17] Bourimi, M. et al. (2010). AFFINE for Enforcing Earlier Consideration of NFRs and Human Factors When Building Socio-Technical Systems Following Agile Methodologies. En International Conference on Human-Centred Software Engineering. Berlin, Germany.
- [18] Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.
- [19] Principios del Manifiesto Ágil. Recuperado: <http://agilemanifesto.org/iso/es/principles.html>.

Cecilia Ávila-Garzón¹
Paula Rodríguez-Marín²
Jorge Bacca-Acosta¹
Jhosep García-Aldana¹

¹Fundación Universitaria Konrad Lorenz
²Instituto Tecnológico Metropolitano
Colombia

Uno de los objetivos de la web semántica es hacer que la información que se publica en la web tenga un mayor sentido y significado. Además, los avances en tecnologías de web semántica y el aumento de información y datos disponibles de forma pública han hecho que desde diferentes contextos se adopten estrategias para el uso de datos enlazados en abierto. Este tipo de datos han sido utilizados ampliamente en el ámbito académico. Los principales focos abordados en las investigaciones en esta área giran en torno a retos como el manejo de bibliotecas digitales, los recursos educativos abiertos, gestión del currículo, educación superior en general y gestión de información en investigación. Sin embargo, la falta de concientización sobre la existencia de técnicas y estrategias para gestionar y divulgar la información académica representa un limitante para aportar a la visibilidad de las instituciones de educación tanto a nivel tanto nacional como internacional. En este capítulo se presenta una revisión de literatura en torno al uso de los datos enlazados en abierto en la academia durante los últimos 20 años. Para llevar a cabo esta revisión aplicó un análisis bibliométrico con un conjunto de 1610 estudios obtenidos de la base de datos Scopus. Los resultados obtenidos permiten dar un reporte sobre la tendencia en publicaciones a través del tiempo, los países que más han aportado estudios en esta área, las fuentes de publicación más concurridas y los temas más relevantes.

1. INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo aumenta el volumen de información disponible en Internet y por ello, la información debe presentarse de una forma bien estructurada y debe proveerse de manera que pueda ser reutilizada en diferentes contextos. Esto con el fin de poder acceder más rápido y de una forma más sencilla a los datos. Dada esta necesidad es que desde el área de la web semántica surgió el concepto de datos enlazados que va más allá de tener una web de documentos y se enfoca en una web de datos [1]. Más recientemente, se habla de datos enlazados en abierto o Linked Open Data LOD, que se refiere a utilizar, sin restricciones, datos enlazados que son accesibles al público a través de Internet [2].

Sin embargo, la gran cantidad de datos enlazados en Internet, la naturaleza heterogénea de los datos, la interoperabilidad y el conocimiento técnico que se requiere para la implementación y puesta en marcha de soluciones basadas en datos enlazados en abierto, son algunos de los retos que dificultan el trabajo con este tipo de datos [3]. El punto de partida para solventar este tipo de retos es tener un conocimiento de las posibilidades que traen los datos enlazados en abierto desde una perspectiva de los estudios que exploran el uso de estos en diferentes contextos [4].

Uno de los contextos donde más se ha explorado el uso de los datos enlazados y datos enlazados en abierto es en el contexto académico, destacándose estudios como: gestión de conocimiento en una red de investigación para el manejo de rankings universitarios [5]; gestión de conocimiento en investigación [6]-[9]; educación superior [10]; gestión de comunidades de práctica [11] el uso de datos enlazados en abierto en la educación [12]; secuencias automáticas de contenido usando datos enlazados en abierto [13]; y mejoramiento de la visibilidad institucional en educación superior mediante indicadores alométricos o métricas de analítica web que se relacionan con las menciones en plataformas de divulgación web o redes sociales [14], entre otros.

Además, diferentes autores han discutido sobre los beneficios que trae el manejo de datos enlazados, datos en abierto o datos enlazados en abierto. Por ejemplo, en el campo de la investigación, Allen y Mehler [15] plantean que los artículos que publican abiertamente sus conjuntos de datos tienden a recibir un mayor número de citaciones que aquellos que no. Chang, Chen, Lane y Weinberg [16] presentan un caso particular en el uso de datos enlazados para realizar una trazabilidad de financiación de investigaciones a nivel doctoral y cómo esta información permite analizar el soporte que reciben los doctorandos para tomar decisiones sobre las ayudas a brindar a futuros recipientes de estas ayudas; Joerg et. al. [17] plantean que los sistemas de información en investigación son imprescindibles para la toma de decisiones en diferentes fases de un proceso investigativo y que estos sistemas deben hacer uso de datos enlazados en abierto para llegar de una forma más fácil a la información.

El análisis bibliométrico presentado en este trabajo se enfoca en artículos publicados en revistas, conferencias y libros. Un total de 1611 estudios fueron analizados y las preguntas a responder y que pretenden dar un panorama de la investigación en el área son:

- ¿Cuál es la evolución de los datos enlazados en abierto en la academia en términos de la tasa de publicación anual, los países más contribuyentes y las fuentes de publicación más relevantes?

- ¿Cuáles son los autores más contribuyentes en el área de datos enlazados en abierto en la academia considerando el número de publicaciones y citas?
- ¿Cuáles son los tópicos más relevantes teniendo en cuenta el análisis de contenido en resúmenes y palabras clave?

La principal contribución de este trabajo es que provee un panorama de la investigación en datos enlazados en abierto en la academia y su evolución a través del tiempo, así como los autores más relevantes y las tendencias de investigación. Esta información puede resultar de especial interés para los investigadores que quieren adelantar estudios sobre la adopción, uso, diseño o implementación de este tipo de datos en el contexto académico.

2. MÉTODO

2.1 Análisis bibliométrico

En el campo de la cienciometría, los análisis bibliométricos se definen como análisis estadísticos que permiten obtener resultados cuantitativos con base en información obtenida de diferentes fuentes de consulta [18]. Los análisis bibliométricos han sido utilizados en diferentes estudios de investigación en campos tales como la educación [19], economía [20], psicología [21], y biología [22], entre otros. De esta forma, se pueden obtener resultados generales o detallados que dan cuenta del estado actual de un campo de investigación.

Además, algunas bases de datos investigativas incluyen filtros para consultar cierta información bibliométrica por medio de visualizaciones. En este capítulo se utilizarán las siguientes herramientas:

- Base de datos Scopus: una de las bases de datos científicas más utilizadas a nivel mundial [23].
- Bibliometrix: es un paquete de R que permite realizar análisis bibliométrico a partir de conjuntos de datos provenientes de bases de datos como Scopus o Web of Science [24]. Bibliometrix cuenta con una interfaz web que puede ser utilizada por personas que no estén familiarizadas con la ejecución de comandos en R.
- VOSviewer: Es una herramienta que permite construir y visualizar redes bibliométricas [25]. Dichas redes pueden incluir información sobre revistas, autores, palabras clave o publicaciones individuales.

2.2 Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión son:

- Artículos de revista, revisiones, artículos de conferencia, libros y capítulos de libro indexados en Scopus.
- Artículos enfocados en datos enlazados en abierto en la academia.

Los criterios de exclusión son:

- Documentos de tipo revisiones de libros, notas, revisiones cortas, correcciones y editoriales.
- Documentos publicados de 1999 hacia atrás.

2.3 Búsqueda y filtros

La búsqueda se realizó en la base de datos de Scopus, una de las bases de datos científicas más utilizadas en el área de ciencias de la computación [23], utilizando la siguiente cadena de búsqueda:

TITLE (linked open data OR linked data OR open data OR datos enlazados en abierto OR (datos enlazados AND abierto)) AND TITLE-ABS-KEY (universi OR educa* OR research*) AND (PUBYEAR > 1999) AND (EXCLUDE (DOCTYPE , cr) OR EXCLUDE (DOCTYPE , ed) OR EXCLUDE (DOCTYPE , no) OR EXCLUDE (DOCTYPE , le) OR EXCLUDE (DOCTYPE , sh) OR EXCLUDE (DOCTYPE , tb) OR EXCLUDE (DOCTYPE , Undefined) OR EXCLUDE (DOCTYPE , er))*

Una vez realizada la búsqueda se obtuvieron 1610 resultados los cuales fueron analizados utilizando las herramientas ya mencionadas. Los resultados obtenidos fueron exportados a un archivo BibTex (para bibliometrix) y a un archivo CSV (para VOSviewer). La información incluida de cada artículo fue: autor(es), título, año, fuente, volumen, fascículo, páginas, citas, tipo de documento, DOI, lenguaje, resumen, palabras clave y referencias.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis de metadatos

Descripción general de los artículos. En la Tabla 1 se presenta la información principal del conjunto de artículos recuperados en la búsqueda realizada. Esta tabla da una visión general de la cantidad de artículos, palabras clave, citas y colaboraciones. En la Tabla 2 se presentan los resultados por tipo de documento. Como se observa, más del 50% de los artículos se encuentran publicados en memorias de conferencias.

Tabla 1. Información general de los artículos

Ítem	Cantidad
Documentos	1610
Fuentes (Revistas, Libros, etc.)	763
Palabras clave Plus	6521
Palabras clave del autor	3420
Periodo	2000-2020
Promedio de citas por documento	9.183
Autores	4456
Apariciones de autores	5864
Autores con documentos de autoría única	196
Autores con documentos de múltiple autoría	4260
Documentos con un solo autor	217
Documentos por autor	0.361
Autores por documento	2.77
Co-autores por documento	3.64
Índice de colaboración	3.06

Tabla 2. Artículos por tipo de documento

Tipo	Cantidad
Artículos de conferencia	910
Artículos de revista	606
Revisiones	46
Capítulos de libro	39
Libros	9
Total	1610

- Producción científica anual.* En la ventana de tiempo seleccionada (2000-2020) se puede apreciar que en los primeros diez años el nivel de publicaciones fue menor a 30 publicaciones por año. A partir del año 2011 la cantidad de publicaciones por año ascendió a las de 50 por año, siendo el año 2018 el año con mayor número de publicaciones (233). Además, para el presente año se realizó una proyección del posible número de publicaciones obteniendo un estimado de 204 publicaciones. Siendo este un indicador de que el interés por la investigación sobre datos enlazados y su efecto o impacto en la academia aún persiste.

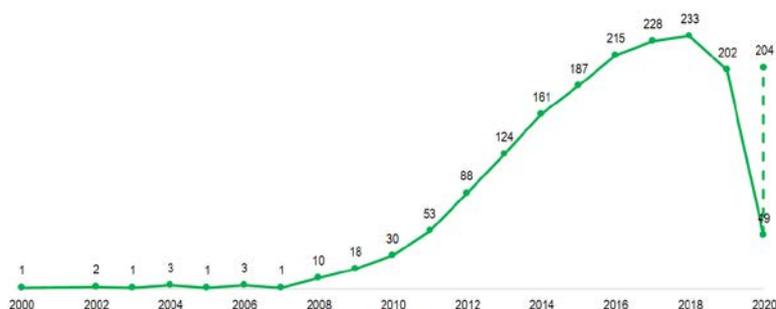


Figura 1. Producción científica anual

- Producción científica por países.* Con respecto a la producción científica de cada país, un total de 85 países reportan contribuciones en el área. Además, en la Figura 2 se muestra un gráfico con el top-20 de los países más contribuyentes, de los cuales el que más se destaca es Estados Unidos (EEUU) con un total de 434 contribuciones, seguido por Reino Unido (305) y Alemania (249). Los demás países reportan entre 47 y 175 contribuciones. Este indicador puede servir como medio para identificar aquellos países donde se puede encontrar un mayor número de investigadores en el área de datos enlazados en abierto en la academia y es aquí donde radica la importancia de establecer colaboraciones que permitan contribuir a la investigación y al reconocimiento del trabajo que se realiza en los diferentes países.

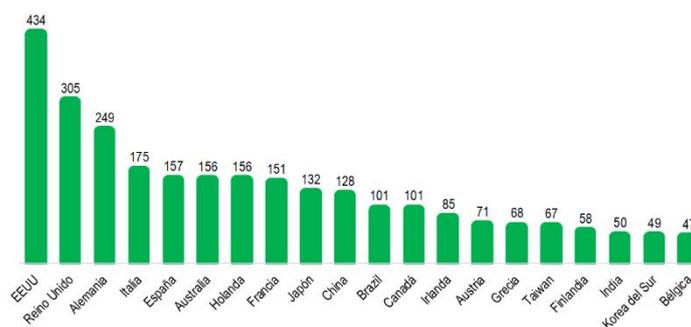


Figura 2. Top-20 de los países más contribuyentes

Tabla 3. Conferencias/libros más relevantes

Fuente	Cantidad
Lecture Notes in Computer Science (AI and Bioinformatics)	170
Ceur Workshop Proceedings	153
Acm International Conference Proceeding Series	94
Communications in Computer and Information Science	50
Procedia Computer Science	13
Proceedings of The Association for Information Science and Technology	12
Lecture Notes in Business Information Processing	11
IEEE Global Engineering Education Conference EDUCON	7
Proceedings of Science	7

Tabla 4. Revistas más relevantes

Fuente	Cantidad	CiteScore	SJR	Cuartil
Semantic Web	15	5.84	1.753	Q1
Government Information Quarterly	13	7.10	4.311	Q1
Plos One	11	3.02	1.100	Q1
Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research	9	1.23	0.35	Q2
Journal of Library Metadata	7	0.69	0.42	Q2
Studies in Health Technology and Informatics	7	0.48	0.250	Q3
Transforming Government: People Process and Policy	7	2.07	0.644	Q2
Advances in Intelligent Systems and Computing	6	0.57	0.174	Q3
BMJ Open	6	2.42	1.321	Q1
IEEE Access	6	4.64	0.609	Q1

Como se puede observar en la Tabla 3 y la Tabla 4, la mayoría de los artículos han sido publicados en memorias de conferencias o como capítulos de libro.

- *Afiliaciones más contribuyentes.* Este ítem se refiere a las instituciones que más artículos han contribuido y que fueron reportadas por los autores como su dirección de correspondencia. La Tabla 5 presenta el top-10 de las instituciones más contribuyentes en el área junto con el artículo más relevante de cada una de las instituciones.

Tabla 5. Instituciones más contribuyentes

Fuente	Cant.	Artículo más relevante	
		Autores	Título
National University of Ireland Galway	39	Zehra, D.Email Author, Jha, A., Khan, Y., Hasnain, A., d'Aquin, M., Sahay, R. [26]	A cancer genomics data space within the linked open data (LOD) cloud
Insight Centre for Data Analytics	39	Karim, M.R., Michel, A., Zappa, A., Baranov, P., Sahay, R., Rebholz-Schuhmann, D. [27]	Student research abstract: Discovering and linking with Life Sciences Linked Open Data Cloud
Delft University of Technology	34	Juergens, H., Niemeijer, M.a., Jennings-Antipov, L.D.b, Mans, R., Morel, J., van Maris, A.J.A., Pronk, J.T., Gardner, T.S. [28]	Evaluation of a novel cloud-based software platform for structured experiment design and linked data analytics.
Open University	25	d'Aquin, M. [11]	On the use of linked open data in education: Current and future practices.
University of Oxford	25	Burrows, T. et. al. [29]	Linked open data vocabularies and identifiers for medieval studies.
Universidad Politécnica de Madrid	23	Piedra, N., Tovar, E., Colomo-Palacios, R., Lopez-Vargas, J., Chicaiza, J.A. [30]	Consuming and producing linked open data: The case of OpenCourseWare.
University of Southampton	21	Khan, A., Tiropanis, T., Martin, D. [31]	Exploiting semantic annotation of content with Linked Open Data (LoD) to improve searching performance in web repositories of multi-disciplinary research data.
Aalto University	21	Leskinen, P., Hyvönen, E. [32]	Linked open data service about historical Finnish academic people in 1640–1899.
CNRS Centre National de la Recherche Scientifique	20	Lane, J.I., Owen-Smith, J., Rosen, R.F., Weinberg, B.A. [33]	New linked data on research investments: Scientific workforce, productivity, and public value
Vrije Universiteit Amsterdam	20	Meroño-Peñuela, A., Ashkpour, A., Guéret, C., Schlobach, S. [34]	CEDAR: The Dutch historical censuses as Linked Open Datas

Al analizar cada uno de los artículos relevantes de las instituciones más contribuyentes, se observa que en su mayoría abordan temáticas relacionadas con el ámbito académico.

3.2 Análisis de autores

- *Autores más contribuyentes y sus publicaciones a través del tiempo.* La producción de los autores a través del tiempo se describe con base en la cantidad de contribuciones realizadas y la cantidad de citaciones recibidas. En la Figura 5 se puede apreciar la lista de los 20 autores más relevantes y cada círculo en esta gráfica tiene un significado. A mayor es el tamaño del círculo, mayor es el número de contribuciones de cada autor en cada año y entre más

intenso es el color del círculo, mayor número de citas ha recibido el autor en cada año. Observando la cantidad de contribuciones de cada autor, el autor más relevante es Janssen, M. con 25 publicaciones y, con respecto al número de citas Bizer, C. es el autor más citado con 268 citas en el año 2009.

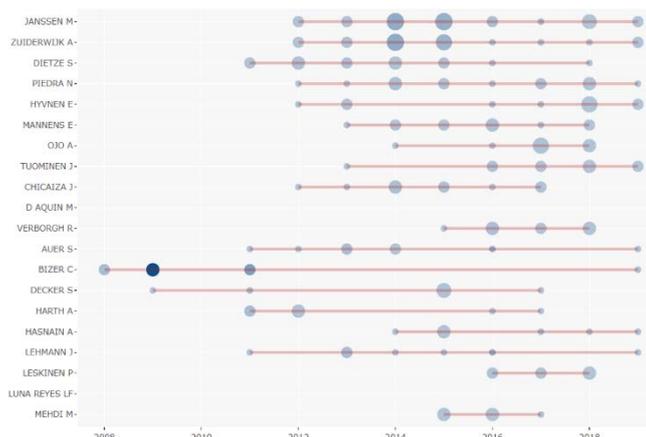


Figura 5. Producción de los autores a través del tiempo

- *Artículos por relevancia según la búsqueda en Scopus.* Al organizar la búsqueda de Scopus por relevancia, se seleccionaron algunos artículos que de acuerdo con su título se relacionan con la aplicación de datos enlazados en abierto en la academia. Por ejemplo, Cadme y Piedra [35] describen un modelo que desarrollaron para la representación de datos sobre investigación en las universidades ecuatorianas. En este modelo consideraron un proceso de ciclo de vida que involucra las etapas de colección de datos, procesamiento, transformación, mejora y publicación de los datos. Manrique [13] presenta la propuesta para un servicio que propende la búsqueda y organización de contenidos para estudiantes que dirigen su propio proceso de aprendizaje.

El servicio se basa en conjuntos de datos enlazados en abierto y consta de dos componentes, un gráfico de los conceptos de aprendizaje interrelacionados y un componente para la creación de secuencias de aprendizaje considerando el objetivo de aprendizaje y el perfil del estudiante. D'Aquin [12] presenta un resumen del estado actual (para 2014) del uso de datos enlazados en abierto en la educación. Allalouf, Artyomov y Mendelsson [36] presentan un sistema para interoperabilidad de bibliotecas mediante el uso de datos enlazados en abierto. Silva, et al. [37] presentan una plataforma denominada Dendro que está enfocada a ayudar a los investigadores para utilizar conceptos presentes en ontologías basadas en dominios de conocimiento específicos y así, de forma colaborativa describir y compartir conjuntos de datos con sus grupos de trabajo. Otro caso específico para la gestión de datos enlazados en abierto para el consumo y producción de datos en ambientes tipo OCW (opencourseware) [30].

3.3 Análisis de contenido

- *Temas en tendencia.* En la Figura 6 se observa una gráfica de los temas en tendencia en cada año. Al generar este tipo de gráficas que se basan en las palabras clave de autor, puede darse el caso que aparezcan términos como position papers, female, humans que no tienen que ver directamente con las temáticas tratadas en la revisión literaria. En la gráfica se puede observar que la mayoría de los términos destacados en cada año tienen que ver más con aspectos tecnológicos, mientras que unos pocos tienen que ver directamente con el contexto académico como research, open universities standarization, y bibliographic data.

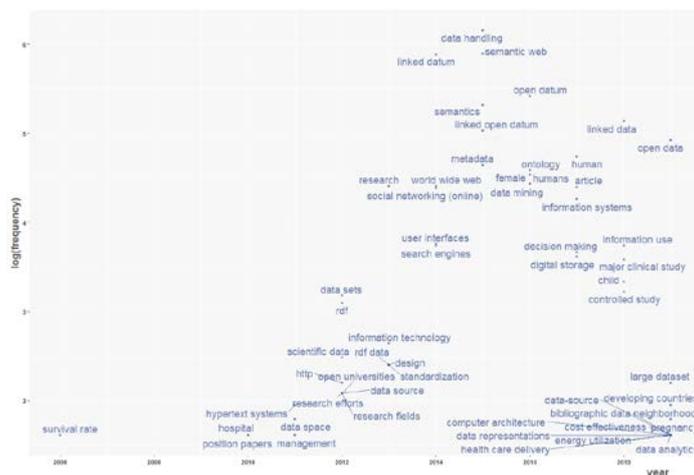


Figura 6. Temas en tendencia

- *Co-ocurrencia de palabras.* Como se ha visto antes, las palabras clave utilizadas por los autores en un artículo juegan un papel muy importante en tanto permiten determinar los tópicos generales que se están abordando y cómo estos se van conectando con otros tópicos. En la Figura 7 se observa la co-ocurrencia de palabras clave dentro de las que se destacan linked data y open data. En esta gráfica se hace un poco más evidente los términos relacionados al aspecto académico puesto que se pueden observar palabras como open education resources, open education, higher education, libraries, ocw (OpenCourseWare), research, knowledge representation.

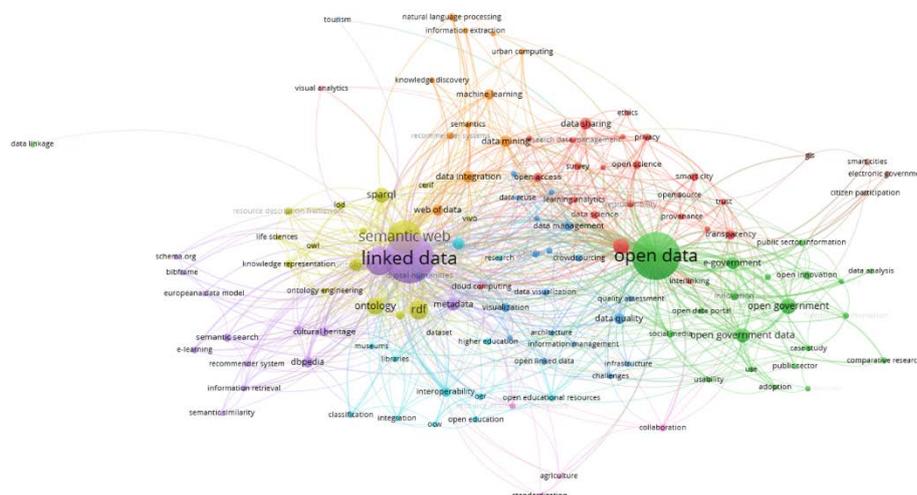


Figura 7. Co-ocurrencia de palabras clave

4. CONCLUSIONES

Para el acceso a los grandes volúmenes de datos se hace necesario estructurarse en información disponible que pueda ser utilizada y reutilizada en distintos contextos. En los últimos años se ha venido dando fuerza al concepto de ciencia abierta (*open science*) donde se busca colocar a disposición del público las investigaciones y la trayectoria investigativa de las instituciones y sus miembros [38]. Los datos enlazados en abierto se refieren al uso de información accesible al público a través de internet, sin embargo, siguen siendo grandes volúmenes de datos y por ello, este estudio se enfoca en conocer la perspectiva de los estudios que exploran el uso de este tipo de datos en diferentes contextos, principalmente el académico- investigativo.

En este trabajo se presenta un análisis bibliométrico del uso de los datos enlazados en abierto en la academia en los últimos 20 años, donde se recuperaron 1610 estudios de la base de datos Scopus y se utilizó las herramientas bibliometrix [24] y VOSviewer [25] para analizar los resultados. Se realizó un análisis de los metadatos, los autores y el contenido de los estudios. En el análisis de los metadatos se descubrió que la mayoría de los documentos se encuentran publicados en artículos de conferencia y en menor medida en artículos de revista. También se reveló que a partir del año 2011 la cantidad de publicaciones de este tema por año ascendió, siendo el año 2018 el año con mayor número de publicaciones. Respecto a los países que publican más estudios de los datos enlazados en abierto en el contexto de educación, Estados Unidos se lleva el primer lugar con un total de 434 contribuciones, seguido por Reino Unido y Alemania.

Entre las fuentes de publicación de mayor número de artículos de este tema en conferencias se encuentran Lecture Notes in Computer Science (AI and Bioinformatics, Ceur Workshop Proceedings, Acm International Conference Proceeding Series y Communications in Computer and Information Science. Y las revistas más relevantes para la publicación están: Semantic Web, Government Information Quarterly y Plos One.

Respecto al análisis realizado de los autores, se encuentra que el autor más relevante es Janssen, M. con 25 publicaciones y, con respecto al número de citas Bizer, C. es el autor más citado con 268 citas en el año 2009. Para el análisis de contenido, se encontró que la mayoría de los términos destacados en cada año se relacionan más con aspectos tecnológicos y muy pocos están directamente relacionados con el contexto académico – investigativo.

La principal contribución de este capítulo es que provee un panorama de la investigación en el uso de datos enlazados en abierto en la academia y su evolución a través del tiempo, así como los autores más relevantes y las tendencias de investigación. Esta información puede resultar de especial interés para los investigadores que quieren adelantar estudios sobre la adopción, uso, diseño o implementación de este tipo de datos en el contexto académico.

REFERENCIAS

[1] Bizer, C., Heath, T. y Berners, T. (2009). Linked Data - The story so far. Int. J. on Semantic Web and Inf. Systems, 5, 1-22.

- [2] Berners, T. y O'Hara, K. (2013). The read-write Linked Data Web. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371, 67-88.
- [3] Dadzie, A. y Pietriga, E. (2013). Visualisation of Linked Data – Reprise. *Semantic Web*, 8 (1), 1-21.
- [4] Avila, C. (2020). Applications, Methodologies, and Technologies for Linked Open Data: A Systematic Literature Review. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, 16(3), 53-69.
- [5] Meymandpour, R. y Davis, J. (2013). Ranking universities using linked open data. En *CEUR Workshop*. Madrid, Spain.
- [6] Albert, P. et. al. (2012). Research discovery through linked open data. En *12th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries*, Orlando, USA.
- [7] Hladky, D., Klintsov, V. y Drobyazko, G. (2012) Enabling russian national knowledge with linked open data (LOD Russia). En *CEUR Workshop*. Boston, USA.
- [8] Nonthakarn, C. y Wuwongse, V. (2012). Linked OpenScholar: A researcher network using linked open data. *Lecture Notes in Computer Science*, 7634, 325-328.
- [9] Zaveri, J. et. al. (2013). Using linked data to evaluate the impact of research and development in Europe: A structural equation model. *Lecture Notes in Computer Science*, 8219, 244-259.
- [10] Zabliith, F., Fernández, M. y Rowe, M. (2015). Production and consumption of university Linked Data. *Interactive Learning Environments*, 23(1), 55-78.
- [11] Rajabi, E. y Marenzi, I. (2015). Linking a community platform to the linked open data cloud. En *24th International Conference on World Wide Web*. New York, USA.
- [12] d'Aquin, M. (2016). *On the Use of Linked Open Data in Education: Current and Future Practices*. Springer.
- [13] Manrique, R. (2017). Towards automatic learning content sequence via linked open data. En *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence*. Porto, Portugal.
- [14] Torres, D. et. al. (2018). Altmétricas a nivel institucional: visibilidad en la Web de la producción científica de las universidades españolas a partir de Altmetric.com. *El Profesional de la Información*, 27(3), 483-492.
- [15] Allen, C. y Mehler, D. (2019). Open science challenges, benefits and tips in early career and beyond. *PLOS Biology*, 17(5), 1-14.
- [16] Chang, W. et. al. (2019). Federal funding of doctoral recipients: What can be learned from linked data. *Research Policy*, 48(6), 1487-1492.
- [17] Joerg, B. et al. (2012). Connecting closed world research information systems through the linked open data web. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 22(3), 345-364.
- [18] Ellegaard, O. y Wallin, J. (2015). The bibliometric analysis of scholarly production: How great is the impact? *Scientometrics*, 105(3), 1809-1831.
- [19] Fellnhofner, K. (2019). Toward a taxonomy of entrepreneurship education research literature: A bibliometric mapping and visualization. *Educational Research Review*, 27, 28-55.
- [20] Wei, G. (2019). A Bibliometric Analysis of the Top Five Economics Journals During 2012–2016. *Journal of Economic Surveys*, 33(1), 25-59.
- [21] Zyoud, S. et. al. (2018). Global trends in research related to social media in psychology: mapping and bibliometric analysis. *International Journal of Mental Health Systems*, 12(1), 4-11.
- [22] Yang, G. y Wu, L. (2017). Trend in H₂S Biology and Medicine Research-A Bibliometric Analysis. *Molecules*, 22(12), 18-29.
- [23] Falagas, M. et. al. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses, *FASEB J.*, 22(2), 338-342.
- [24] Aria, M. y Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975.
- [25] van Eck, N. y Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538.
- [26] Zehra, D. et. al. (2019). A cancer genomics data space within the linked open data (LOD) cloud. En *CEUR Workshop*. México, México.
- [27] Karim, M. et. al. (2018). Improving data workflow systems with cloud services and use of open data for bioinformatics research. *Briefings in bioinformatics*, 19(5), 1035-1050.
- [28] Juergens, H. et al. (2018). Evaluation of a novel cloud-based software platform for structured experiment design and linked data analytics. *Scientific Data*, 5, 19-28.
- [29] Burrows, T. (2012). A machine for browsing: Beyond the single search box. *OCLC Systems and Services*, 28 (1), 56-58.
- [30] Piedra, N. et. al. (2014). Consuming and producing linked open data: The case of OpenCourseWare. *Program*, 48(1), 16-40.
- [31] Khan, A., Tiropanis, T. y Martin, D. (2016). Exploiting semantic annotation of content with Linked Open Data (LoD) to improve searching performance in web repositories of multi-disciplinary research data. *Communications in Computer and Information Science*, 573, 130-145.
- [32] Leskinen, P. y Hyvönen, E. (2020). Linked open data service about historical Finnish academic people in 1640–1899. En *CEUR Workshop*. London, UK.
- [33] Lane, J. et. al. (2015). New linked data on research investments: Scientific workforce, productivity, and public value. *Research Policy*, 44(9), 1659-1671.
- [34] Meroño, A. et. al. (2017). CEDAR: The Dutch historical censuses as Linked Open Data. *Semantic Web*, 8(2), 297-310.
- [35] Cadme, E. y Piedra, N. (2018). Producing linked open data to describe scientific activity from researchers of Ecuadorian universities. En *37th Central America and Panama Convention*. Panamá, Panamá.
- [36] Allalouf, M. (2015). Big data in the library: Extending modern library catalogues with data visualization, linking and mining. En *6th International Workshop on Software Knowledge, in conjunction with IC3K*. Paris, France.
- [37] Da Silva, J. et. al. (2014). Dendro: Collaborative research data management built on linked open data. *Lecture Notes in Computer Science*, 8798, 483-487.
- [38] Vicente, R. y Martínez, C. (2018). Open Science now: A systematic literature review for an integrated definition. *Journal of Business Research*, 88, 428-436.

Una visión de la tecnología para la Gestión del Conocimiento: Resultados en la literatura latinoamericana

Luciano Nicolás Straccia

Cecilia Ramacciotti

María Florencia Pollo-Cattaneo

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires
Argentina

La revisión de la literatura contribuye a la investigación permitiendo, entre otras cosas, identificar aquellas áreas donde existen mayores antecedentes y aquellas donde se necesitan nuevos trabajos. Este trabajo presenta una revisión sistemática de la literatura y busca constatar la hipótesis de una vasta presencia de artículos de investigación del área de la Gestión del Conocimiento que se relacionan una visión de procesos por sobre una visión tecnológica. En este trabajo se realiza una revisión sobre la literatura presente en el ámbito latinoamericano y en el ámbito nacional argentino y se analizan sus temáticas a partir de la construcción de categorías asociadas a los componentes de la Gestión del Conocimiento. Los resultados de la revisión permiten constatar la hipótesis definida, pero además generan nuevos hallazgos, tales como la revalorización de la representación del contenido como un elemento fundamental para la toma de decisiones vinculadas a la tecnología.

1. INTRODUCCIÓN

La revisión de la literatura permite apoyar la identificación de un tema de investigación o hipótesis, identificar la literatura que contribuirá a la investigación, ayudar a construir la comprensión de los conceptos teóricos y la terminología, facilitar la construcción de lista de fuentes bibliográficas de referencia [1].

El presente capítulo de revisión de la literatura busca constatar la hipótesis de una vasta presencia de artículos relacionados con la Gestión del Conocimiento que presentan una visión de procesos por sobre una visión tecnológica. En [2] se afirma que la revisión de la literatura crea una base firme para avanzar en el conocimiento. Facilita el desarrollo de la teoría, cierra áreas donde existe una gran cantidad de investigación y descubre áreas donde se necesita investigación.

Según [3] una revisión de la literatura puede considerarse como un procedimiento científico que debe guiarse por un método de investigación apropiado. Por ello, en el presente trabajo se aplica un método preciso, basado en los aportes de Kitchenham.

2. BASES CONCEPTUALES

2.1 Conocimiento

Shannon [4] y Weaver [5] introdujeron tempranamente los conceptos de dato e información, aunque con algunas diferencias terminológicas, incorporando ideas de lo físico (lo captable con el sentido) y el significado. Más recientemente los trabajos de Timpson [6-9] retoman los debates respecto a estos conceptos. En este trabajo se considera al dato como representación de un hecho aislado, fuera de contexto; e información, como colección de datos estructurados en un contexto (datos con significado) [10, 11].

Las nociones de dato e información fueron incorporadas en la denominada Jerarquía DIKW, presentada por Ackoff [12] y que puede hallarse en la Figura 1, que sostiene que se trata de una cadena jerárquica en la que cada concepto añade valor al previo. Esta jerarquía tiene como elemento base al dato (*data*); un nivel superior, a la información (*information*); posteriormente, al conocimiento (*knowledge*) y en el nivel superior, la sabiduría (*wisdom*).

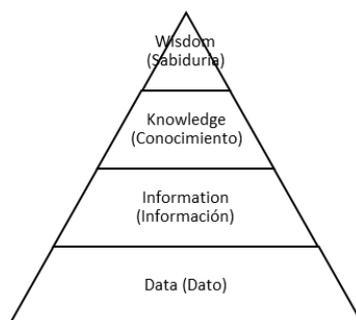


Figura 1. Pirámide de la jerarquía DIKW

Cornella [13] sostiene que la metabolización de la información, su conversión en estructuras mentales, generalmente permanentes, lleva a la creación de conocimiento en nuestras mentes, siendo hechos con sentido y con estructura

[14]. El conocimiento resulta una respuesta apropiada y persistente a una entrada dada [15] y su valor está asociado a las ocasiones en las cuales se requiere su aplicación. Finalmente, si al conocimiento se lo somete a juicios de valor y se lo dota de una ética, deviene sabiduría [16]. Para Díaz y Millán [17] el conocimiento se define como: la mezcla de creencias cognitivas y contextualizadas, perspectivas, juicios, metodologías, información, experiencias y expectativas hechas sobre un objeto, que se adaptan y potencializan por la mente de un individuo (conocedor). Por otro lado, Rueda [18] afirma que el conocimiento provee las bases que permiten generar una visión crítica del entorno. Es decir, gracias al conocimiento se puede entender e interpretar el entorno.

2.2 Gestión del Conocimiento

La Gestión del conocimiento (GC) es un proceso a través del cual las organizaciones logran descubrir, utilizar y mantener el conocimiento, con la idea de alinearlos con las estrategias de negocio para la obtención de ventajas competitivas [19], Perez y Urbáez [20] definen GC como un enfoque gerencial o disciplina emergente que busca de manera estructurada y sistemática aprovechar el conocimiento generado para alcanzar los objetivos de la organización y optimizar el proceso de toma de decisiones. Según [21], la gestión del conocimiento desde la psicología social de las organizaciones radica en un proceso de influencia social de grupos colaborativos en torno a la transferencia de un conocimiento implícito hacia un resguardo del conocimiento tácito a fin de poder aprovechar la experiencia y habilidades de talentos y líderes ante las contingencias, o riesgos y amenazas del contexto [22].

Para Gomez y García [23], la gestión del conocimiento está sustentada por cuatro componentes: personas, procesos, contenidos y tecnologías de la información y comunicación [24-26]. Estos componentes son coincidentes con los considerados en [27]: las personas (roles y responsabilidades, motivación, incentivos), la tecnología, los procesos y los contenidos. La noción de contenidos podría ser asimilada con el concepto de representación de contenidos y sus métodos [28]. En [29] se definen los denominados conductores base para la GC: roles y responsabilidades; elementos del proceso; elementos de gobernanza (políticas, métricas e incentivos) y los elementos tecnológicos.

Según [30, 31] para lograr tener éxito en la gestión del conocimiento en las organizaciones es necesario considerar aspectos organizacionales, sociales y técnicos. Estos aspectos organizacionales también están presentes en la consideración de [32-34] que consideran relevante incluir a la cultura organizacional, también denominado aspectos institucionales por Sobolewska y Bitkowska [35]. Basit, Qazi y Niazi [32] presentaron recientemente una investigación, con base en trabajos de [36, 37], donde se concluye que la confianza de los empleados es prerrequisito para compartir el conocimiento. Saavedra y Verdugo [38] ya habían considerado la cultura como un factor relevante.

Wigg [39] presenta algunas características que debería tener una organización para la implementación de gestión del conocimiento (basándose en el concepto introducido por Garvin [40] sobre cómo debe ser una organización que aprende, es decir, una organización capacitada para la creación, adquisición y transferencia de conocimiento): debe contratar personas dispuesta a aprender, debe influenciar a los empleados a admitir que no saben algo y buscar ayuda en otras personas o departamentos que conozcan el problema y los expertos en la organización deben seguir aprendiendo y renovar sus conocimientos periódicamente. En Nonaka y Takeuchi [41] también se consideran algunos aspectos que la organización debe apoyar en el proceso de conversión del conocimiento: intención y compromiso de la organización, autonomía en todos los niveles, flexibilidad y caos creativo, redundancia (repetir el conocimiento en toda la organización) y requerimiento de diversidad de personal y conocimiento.

Para la revisión de la literatura realizada en este trabajo se consideran los componentes definidos por Milton: roles y responsabilidades, proceso, gobernanza y tecnología, y se incorporan a ellos dos aspectos propuestos en otros trabajos: aspectos organizacionales (en los términos de [30]) y de representación del contenido [28], cuya vinculación puede hallarse en la Figura 2.

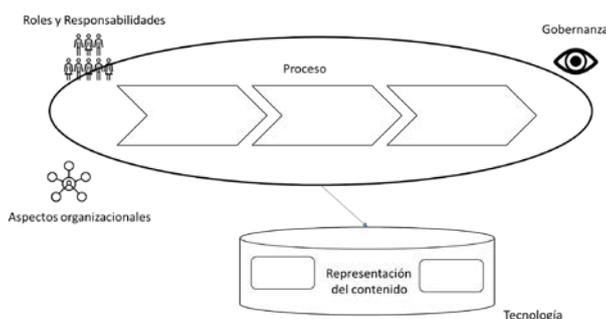


Figura 2. Componentes de la gestión del conocimiento

3. MÉTODO

Para el presente trabajo se sigue el método de revisión de literatura propuesto por Kitchenham [42, 43] compuesto por 3 etapas: planificación de la revisión (que incluye la identificación de la necesidad de revisión y la definición del

protocolo de revisión), desarrollo de la revisión y publicación de los resultados. La definición de un protocolo de revisión tiene los siguientes pasos: definir los términos de búsqueda, identificar las fuentes bibliográficas y definir filtros para la inclusión y exclusión [44].

3.1 Identificación de la necesidad de revisión

Los autores del presente trabajo, formando parte del Grupo de Estudios en Metodología para Ingeniería de Software y Sistemas de Información (GEMIS) de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires (UTN.BA), han trabajado en los últimos años en el análisis de diversos modelos de gestión del conocimiento [45-47], identificando y analizando los modelos de Nonaka y Takeuchi, Wigg, Sveiby, Earl, Kerschberg, Bustelo y Amarilla, Mc. Elroy, CEN, KMC, K-TSACA y, otros destinados especialmente a la industria del software, como Bovea y García e ISECO. Además, en [47] se propone un nuevo modelo de gestión de conocimiento específicamente orientado a las pequeñas y medianas fábricas de software, analizando las dificultades que enfrenta la industria y tipología de organizaciones específica y las características de los diferentes modelos trabajados por diferentes autores.

Se considera necesaria la revisión de la literatura para identificar el estado actual del conocimiento según los diferentes componentes de la gestión del conocimiento propuestos, buscando dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿cuál es el grado de avance en la literatura según cada uno de los componentes de la gestión del conocimiento: roles y responsabilidades, procesos, gobernanza, representación de contenidos, tecnología y aspectos organizacionales?

3.2 Definición del protocolo de revisión

3.2.1 Definición de los términos de búsqueda

Se utilizan las siguientes palabras clave para las búsquedas: gestión del conocimiento y *knowledge management*. En el caso de sitios de idioma español se realiza la búsqueda con palabras clave en dicho idioma; de igual forma, en los sitios de idioma inglés se realiza la búsqueda clave con las palabras en inglés. No se realizan filtros posteriores según esos idiomas (excepto que se trata de idiomas fuera de los criterios de inclusión), sino que se consideran todos los artículos, operando la diferenciación solo en el uso de la palabra clave en la búsqueda.

3.2.2 Identificación de las fuentes bibliográficas

Tal como afirma Washington [48] la facilidad de acceso a fuentes bibliográficas en tiempos de internet es sorprendente, en ocasiones abrumadora, existen bases de datos de artículos científicos, los índices de los *journals* están disponibles, es posible consultar libros, artículos de divulgación, etc.; toda esta abundancia complejiza la tarea del investigador. Por ello se hace necesario una identificación precisa de las fuentes bibliográficas más acordes a la investigación que se lleva adelante. En este trabajo se utilizan las siguientes fuentes bibliográficas:

- Repositorio Institucional de la UNLP (SEDICI): es el repositorio institucional de una de las principales Universidades de la Argentina. La Universidad Nacional de la Plata fue elegida como la institución más transparente de la Argentina por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España por la cantidad de citas sus investigadores y académicos en los perfiles públicos de Google Scholar.
- Sistema Nacional de Repositorios Digitales (SNRD): pertenece al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación y el Consejo Interinstitucional de Ciencia y Tecnología (CICYT), que es el organismo de coordinación del Sistema de Ciencia y Tecnología de la República Argentina. Del SNRD no se consideran en la búsqueda aquellos correspondientes al SEDICI, ya que su búsqueda es realizada en el portal primario.
- Red Federada de Repositorios Institucionales de Publicaciones Científicas: conocida como La Referencia, es una red latinoamericana de repositorios de acceso abierto existente desde el año 2012 y con presencia en 10 países latinoamericanos.
- Redalyc: impulsado por la Universidad Autónoma del Estado de México, en colaboración con instituciones de educación superior, centros de investigación, asociaciones profesionales y editoriales
- Scielo (Scientific Electronic Library Online): es una biblioteca electrónica que conforma una red iberoamericana de colecciones de revistas científicas en texto completo y con acceso abierto, libre y gratuito.

Con el objetivo de obtener mayor grado de diversidad en los hallazgos, se seleccionan fuentes nacionales (SEDICI, SNRD) y otras internacionales latinoamericanas, debido al alcance previsto para el presente trabajo (Scielo, Redalyc, La Referencia).

3.2.3 Definición de criterios de inclusión y exclusión

En la estrategia para la selección de bibliografía se tienen en cuenta los siguientes criterios de inclusión:

- Trabajos publicados entre los años 2019 y 2020
- Trabajos en idioma inglés y español, como estrategia que diversifica las contribuciones para el estudio; se puede incluir, si existieran, algunos hallazgos en francés o portugués, a partir del conocimiento de dichos idiomas por parte de los investigadores
- Trabajos publicados en revistas, memorias de eventos, incluyendo artículos, trabajos de tesis (grado, especialización, maestría o doctorado) o informes técnicos.
- Trabajos publicados bajo las áreas temáticas o disciplinas Administración, Ingeniería e Informática (o afines)

Son excluidos de los hallazgos los trabajos no disponibles para su consulta en forma electrónica.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Búsqueda de estudios primarios

A partir de las palabras clave y los criterios de inclusión y exclusión mencionados, se procede a la búsqueda de resultados. Sobre la totalidad de los resultados se realiza la lectura de los artículos y su inclusión en algunas de las categorías de análisis previstas; esta categorización se presenta en la próxima sección. Los resultados obtenidos en la búsqueda pueden hallarse en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados obtenidos en las búsquedas

Fuente	2019	2020
SEDICI	26	0
SNRD	5	2
La Referencia	52	17
Redalyc	81	10
Scielo	7	5

4.2 Selección de estudios primarios

Según la necesidad de revisión identificada en la primera fase del proceso de búsqueda, las categorías de análisis de los trabajos corresponden a los diferentes elementos de la gestión del conocimiento: roles y responsabilidades, procesos, gobernanza, representación de contenidos, tecnología y aspectos organizacionales. Sobre las búsquedas realizadas se realiza una revisión de los artículos y se seleccionan solo aquellos relevantes para las categorías de análisis definidas. Se realiza el registro en una planilla con el diseño de la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño de planilla para el registro de resultados.

Fuente	Año	Referencia	Roles y responsabilidades	Procesos	Gobernanza	Representa. contenidos	Tecnol.	Aspectos organiza.
--------	-----	------------	---------------------------	----------	------------	------------------------	---------	--------------------

Sobre la cantidad de resultados que pueden hallarse en la Tabla 1, en las Tablas 3 y 4 se presentan los artículos de los años 2020 y 2019, respectivamente, que tras su lectura han sido considerados para su categorización.

Tabla 3. Trabajos del año 2020 categorizados

Fuente	Resultados 2020	Categorizados
SNRD	1	1
La Referencia	17	7
Redalyc	10	3
Scielo	5	1

Tabla 4. Trabajos del año 2019 categorizados

Fuente	Resultados 2019	Categorizados
SEDICI	26	2
SNRD	5	1
La Referencia	52	16
Redalyc	81	6
Scielo	7	3

4.3 Síntesis cuantitativa de la revisión

Tal como se mencionó en la sección anterior, sobre las búsquedas realizadas se realiza una revisión de los artículos y se seleccionan solo aquellos relevantes para las categorías de análisis definidas. También para dicha selección se consideró que se trataran de trabajos vinculados directamente con la gestión del conocimiento, no solo que fuese

posible su aplicación en dicho contexto; por ejemplo, si un trabajo trata de una tecnología que es factible aplicar en el marco de la gestión del conocimiento, pero es presentada en un artículo no vinculado con dicha disciplina entonces no es considerado, ya que se busca analizar la presencia de los diferentes componentes en el propio marco disciplinar.

En este contexto, se han categorizado 40 artículos, con la distribución por categorías según se presenta en la Tabla 5 (la sumatoria de porcentajes excede el 100% dado que algunos trabajos pueden ser incluidos en más de una categoría).

Tabla 5. Componente de la Gestión del Conocimiento considerado en los artículos categorizados

Componente	Artículos en los que aparece	Artículos en los que aparece (% sobre el total de categorizados)
Roles y responsabilidades	1	2,5 %
Aspectos organizacionales	3	7,5 %
Proceso	25	62,5 %
Gobernanza	1	2,5 %
Representación del contenido	1	2,5 %
Tecnología	12	30 %

Puede observarse una evidente mayoría de artículos relacionados con procesos (en ocasiones, denominado modelos) de gestión del conocimiento, confirmando la hipótesis definida en este trabajo.

4.4 Análisis de los artículos categorizados en tecnología

Sobre los artículos categorizados y considerados en el análisis presentado en la Tabla 5, se realiza un análisis más detallado buscando cuáles son las tecnologías y arquitecturas tecnológicas propuestas, otorgando valor cualitativo a la revisión y presentación cuantitativa realizada.

En [49] se presentan algunas herramientas que pueden utilizarse para la gestión del conocimiento: foros colaborativos, blogs, wiki, Slack, gestores de contenido, repositorios digitales. En [50] se mencionan los simuladores, portales de conocimiento corporativo, repositorios digitales, herramientas de búsqueda, entre otros; Business Intelligence, herramientas para la transformación del conocimiento y páginas amarillas además sugiere la creación de mapas de conocimiento, que se trata de un aspecto más cercano a la representación del contenido. En [51] se considera el Big Data como herramienta para la gestión del conocimiento; y en [52] un repositorio de base de datos.

En [53] se realiza un recorrido por diferentes investigaciones y se presentan algunas prácticas para la gestión del conocimiento (inteligencia competitiva, comunidades de práctica, registro de lecciones aprendidas, mapa de conocimiento, mapa de procesos, mejores prácticas, normalización y portales corporativos) y algunas tecnologías (gestión electrónica de documentos, gestión de contenidos, workflow, intranets, extranets, foros, etc.), especialmente basado en el modelo Organizational Knowledge Assessment OKA.

En [54] se realiza un recorrido por las diferentes posibilidades de un Ambiente Virtual para el Aprendizaje. Si bien el hallazgo de este tipo de tecnologías no ha sido el foco principal de este trabajo, en los portales donde se realizó la búsqueda pueden hallarse otros artículos sobre este tipo de ambientes virtuales, espacios colaborativos o similares en las búsquedas relacionadas con la Educación (disciplina que no fue incluida en los criterios de inclusión para este trabajo).

En [55] se presenta una solución de páginas amarillas, una tecnología que permite identificar los datos básicos de un experto, sus redes de contactos, intereses personales y la descripción de su experiencia en la ejecución de los proyectos que ha participado dentro y fuera de la organización, diferenciándola de los directorios por considerar que este último solo incluye el currículum del experto, mientras que las páginas amarillas poseen el conjunto de elementos y relaciones que rodean al experto. Además, el trabajo considera diversas tecnologías asociadas a diferentes etapas de la gestión del conocimiento (socialización, externalización, combinación e internalización) y un Esquema de la Tecnología en la gestión del conocimiento, sin mayor descripción ni detalles de dicho esquema.

En la Tabla 6 se presenta un listado de las tecnologías halladas en la revisión y presentadas en los párrafos precedentes.

Tabla 6. Tecnologías halladas en la revisión

Foros colaborativos	Portales de conocimiento corporativo	Gestor de documentos
Blogs	Herramientas de búsqueda	Intranets
Slack	Business Intelligence	Extranets
Gestores de contenidos	Páginas amarillas	Ambiente virtual para el aprendizaje
Repositorios digitales	Big Data	
Simuladores	Repositorio de Base de Datos	

En [56] se define un modelo de arquitectura de integración tecnológica (que puede verse en la Figura 3) basado en el modelo de Kerchberg [57], que se presenta en la Figura 4. En [58] se presenta una plataforma para repositorios digitales de colecciones biológicas, donde se incluye una arquitectura de capas: presentación, gestión y fuente de datos, basada en [59] y Kerschberg [57] que puede ser visualizada en la Figura 5.

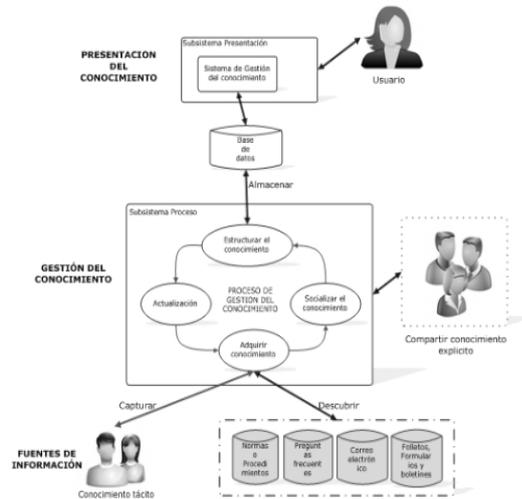


Figura 3. Modelo de arquitectura de integración tecnológica para la gestión de conocimiento [56]

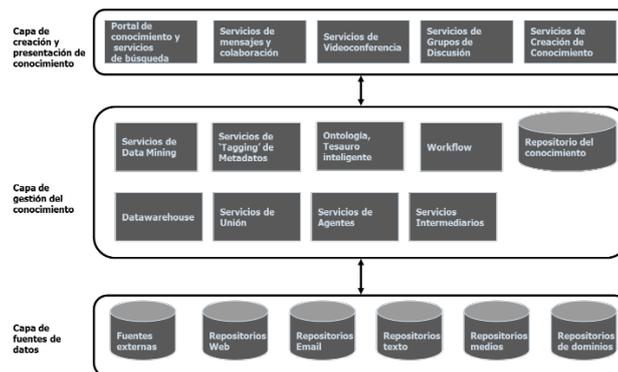


Figura 4. Modelo de arquitectura para la gestión tecnológica de Kerschberg [57]

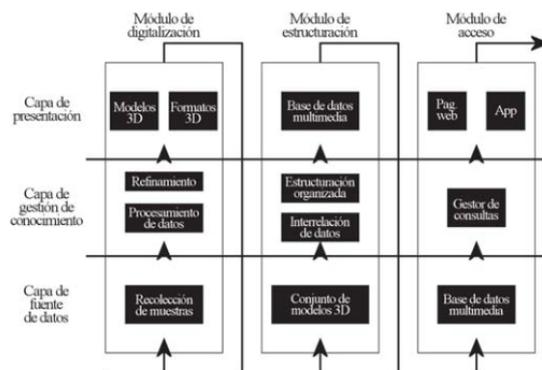


Figura 5. Modelo de arquitectura para la gestión del conocimiento [58]

Finalmente, el único trabajo hallado específicamente destinado a la arquitectura es [60], que presenta una Arquitectura Empresarial para la gestión del conocimiento; si bien la arquitectura empresarial no es equivalente a arquitectura tecnológica o de software, resulta una aproximación relevante para contextualizar la arquitectura tecnológica.

5. CONCLUSIONES

La revisión de la literatura contribuye a la investigación permitiendo, entre otras cosas, identificar aquellas áreas donde existen mayores antecedentes y aquellas donde se necesitan nuevos trabajos. En este trabajo se realiza un estudio y análisis sobre trabajos académicos vinculados a la Gestión del Conocimiento, realizando las búsquedas sobre reconocidos portales y repositorios latinoamericanos (La Referencia, Scielo y Redalyc) y nacionales argentinos (SEDICI y SNRD).

Los trabajos hallados son categorizados según los componentes de la Gestión del Conocimiento alcanzados: roles y responsabilidades, proceso, gobernanza, tecnología, aspectos organizaciones y representación del contenido. Se define la hipótesis de una mayor presencia de artículos que consideran una visión de procesos por sobre una visión tecnológica. Se presentan los resultados con una mirada cuantitativa y se realiza un análisis más detallado sobre los trabajos vinculados a tecnología.

En este contexto, se concluye la presencia de mayor cantidad de artículos vinculados a procesos por sobre trabajos vinculados a tecnologías. En el caso de trabajos asociados a tecnologías para la Gestión del Conocimiento se observa un faltante de investigación sobre arquitectura e integración tecnológica.

En futuros trabajos, se estudiará y analizará literatura anglosajona. Además, se avanzará en el desarrollo de un Proyecto de Investigación y Desarrollo sobre arquitectura tecnológica para la gestión del conocimiento.

REFERENCIAS

- [1] Rowley, J. y Slack, F. (2004). Conducting a literature review. *Management Research News*, 27(6), 80-92.
- [2] Webster, J. y Watson, R. (2002). Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. *MIS Quarterly*, 26(2), 13-23.
- [3] Urbach, N. (2009). The state of research on information systems success. A Review of Existing Multidimensional Approaches. *Business & Information Systems Engineering*, 4, 56-67.
- [4] Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 37, 125-134.
- [5] Shannon, C. y Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press.
- [6] Timpson, C. (2004). *Quantum information theory and the foundations of quantum mechanics*. Disertación doctoral. University of Oxford.
- [7] Timpson, C. (2006). The grammar of teleportation. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 57, 587-621.
- [8] Timpson, C. (2008). Philosophical aspects of quantum information theory. En Rickles, D. (Ed.), *The Ashgate Companion to the New Philosophy of Physics* (pp. 197-261). Ashgate Publishing.
- [9] Timpson, C. (2013). *Quantum information theory and the foundations of quantum mechanics*. Oxford University Press.
- [10] Parra, I. (2004). *Los modernos alquimistas. Epistemología corporativa y gestión de conocimiento*. Editorial EAFIT.
- [11] Lombardi, O., Holik, F. y Vanni, L. (2014). What is Shannon information? *Synthese*, 193, 167-172.
- [12] Ackoff R. (1989). From data to wisdom. *Journal of Applied Systems Analysis*, 16, 3-9
- [13] Cornella, A. (2000). *Infonomía! La empresa es información*. Deusto.
- [14] Chekland, P. y Holwell, S. (1998). *Information, systems and information systems*. John Wiley & Sons.
- [15] Sanders, J. (2016). Defining terms: Data, information and knowledge. En *SAI Computing Conference*. Londres, UK.
- [16] Pollo, M. (2012). *Resolviendo problemas en los sistemas de información. Enfoque para informáticos*. CEIT.
- [17] Díaz, M. y Millán, J. (2013). *Gestión del conocimiento y capital intelectual, a través de modelos universitarios*. CUC.
- [18] Rueda, M. (2014). *La gestión del conocimiento y la ciencia de la información: Relaciones disciplinares y profesionales*. Disertación doctoral. Universidad Carlos III.
- [19] Bueno, E. (2000). *Dirección del conocimiento y aprendizaje: Creación, distribución y mediación de Intangibles*. Omega.
- [20] Avendaño, V. y Flores, M. (2016). Modelos teóricos de gestión del conocimiento: Descriptores, conceptualizaciones y enfoques. *Entreciencias*, 4(10), 68-79.
- [21] Sánchez, A. et al. (2020). Confiabilidad y validez de un instrumento que mide la gestión del conocimiento. *Espacios en blanco*, 30(1), 1-10.
- [22] Cuesta, A. (2012). Modelo integrado de gestión humana y del conocimiento: Una tecnología de aplicación. *Revista Venezolana de Gerencia*, 57, 86-98.
- [23] Gomez, M. y García, M. (2015). Factores influyentes de la gestión del conocimiento en el contexto de la investigación universitaria. *Información, cultura y sociedad*, 33, 156-167.
- [24] Seethamraju, R. y Olivera, M. (2009). Role of process knowledge in business process improvement methodology: A case study. *Business Process Management Journal*, 15(6), 920-936.
- [25] Gallego, D. y Ongallo, C. (2004). *Conocimiento y gestión*. Pearson.
- [26] Canals, A. (2003). *Gestión del conocimiento*. Gestión 2000.
- [27] Barceló, M. (2001). *Hacia una economía del conocimiento*. ESIC Editorial.
- [28] Meneses, J. et al. (2020). Representación del conocimiento de un proceso de co-creación de material educativo. *Tecnológicas*, 23(47), 157-169.
- [29] Milton, N. (2014). The 4 legs on the Knowledge Management table. Recuperado: <http://www.nickmilton.com/2014/10/the-4-legs-on-knowledge-management-table.html>.
- [30] Zytnewski, M. (2016). Integration of knowledge management systems and business processes using multi-agent systems. *International Journal of Computational Intelligence Studies*, 5(2).
- [31] Maier, R. (2007). *Knowledge management systems: Information and communication technologies for knowledge management*. Springer.
- [32] Basit, A., Qazi, T. y Niazi, A. (2020). Expounding dynamics of tacit knowledge critical to credit decision making: Juxtaposed findings of GRA and RIDIT. *Journal of Accounting and Finance in Emerging Economies*, 6(1), 87-106.
- [33] Cumberland, D. y Githens, R. (2012). TK barriers in franchising: Practical solutions. *Jou. of Workplace Lear.*, 24(1), 48-58.
- [34] Wahda, W. (2017). Mediating effect of knowledge management on organizational learning culture toward organization performance. *Journal of Management Development*, 36(7), 846-858.
- [35] Sobolewska, O. y Bitkowska, A. (2020). Selected aspects of evaluating knowledge. *Management quality in contemporary enterprises. Information 2020*, 11(5), 244.
- [36] Brooke, J., Mohd, R. y Abu, B. (2017). Modeling knowledge sharing behaviour using self-efficacy as a mediator. *European Journal of Training and Development*, 41(2), 144-159.

- [37] Park J. y Lee, J. (2014). Knowledge sharing in information systems development projects: Explicating the role of dependence and trust. *International Journal of Project Management*, 32(1), 153-165.
- [38] Saavedra, J., Verdugo, D. y Lacruz, A. (2002). Gestión del conocimiento. *Revista Industrial*, 26(2), 34-45.
- [39] Wiig, K. (1993). Knowledge management foundations: Thinking about thinking – How people and organizations create, represent, and use knowledge. Schema.
- [40] Garvin, D. (1993). Building a learning organization. *Harvard business review*, 71(4), 78-91.
- [41] Nonaka, I. y Takeuchi, H. (1995). *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford University Press.
- [42] Kitchenham, B. (2004). *Procedures for undertaking systematic reviews*. Keele University.
- [43] Kitchenham, B. y Charters S. (2007). *Procedures for performing systematic reviews*. EBSE Technical Report. Keele University.
- [44] Hidalgo, A. et al. (2011). Evidence based scoping reviews. *The Electronic Journal Information Systems Evaluation*, 14(1), 46-52.
- [45] Straccia, L. et al. (2017). La gestión del conocimiento en pequeñas y medianas fábricas de software en el área metropolitana de Buenos Aires. En XIX Workshop de Investigadores de Ciencias de la Computación. Buenos Aires, Argentina.
- [46] Maulini, A., Straccia, L. y Pollo, M. (2018). Una aproximación a un modelo de gestión de conocimiento aplicable a las pequeñas y medianas fábricas de software. En Serna M., E. (Ed.), *Desarrollo e Innovación en Ingeniería* (pp. 5-16). Instituto Antioqueño de Investigación.
- [47] Maulini, A., Straccia, L. y Pollo, M. (2019). Un modelo de gestión de conocimiento aplicable a las pequeñas y medianas fábricas de software. En Serna M., E. (Ed.), *Desarrollo e Innovación en Ingeniería* (pp. 25-35). Instituto Antioqueño de Investigación.
- [48] Washington, J. (2019). La revisión bibliográfica en el Doctorado en Administración. *Ciencias Administrativas* (14), 1-11.
- [49] Rivero, A. (2019). Modelo de gestión del conocimiento basado en el enfoque ágil para mejorar la producción en las empresas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Federico Villarreal.
- [50] Galindo, L. y Álvarez, E. (2019). Propuesta de un modelo de gestión del conocimiento enfocado en el proceso del grupo de servicios administrativos del Ministerio de Minas y Energía. Tesis de Maestría. Universidad Externado de Colombia.
- [51] Moreno, A., Barraza, N. y Daicich, O. (2019). Big Data, enfoques multidisciplinarios para la gestión del conocimiento. En 48 Jornadas Argentinas de Informática. Universidad Nacional de Salta, Argentina.
- [52] Talamante, E. et al. (2019). Use of storage technologies to select knowledge management tools and strategies for M-SMEs. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 68-80.
- [53] Hernandez, B. (2019). Gestão de conhecimento, aprendizagem organizacional e inovação em empresas colombianas que adotam o teletrabalho. Disertación doctoral. Universidade Federal de Minas Gerais.
- [54] González, L. y Jasso, F. (2019). Learning Commons en bibliotecas universitarias. Una revisión dedicada a las características y desafíos de un espacio físico transformado en ambiente para el aprendizaje. *Información, cultura y sociedad*, 41, 45-58.
- [55] Aures, A. (2020). Modelo de páginas amarillas de expertos en las instituciones públicas basado en los enfoques de gestión del conocimiento. Disertación doctoral. Universidad Nacional Federico Villarreal.
- [56] Zavala, E. (2019). Propuesta de software de gestión del conocimiento para la optimización de la orientación al contribuyente. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Federico Villarreal.
- [57] Kerschberg, L. (2001). Knowledge management in heterogeneous data warehouse environments. En *International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery*. Berlin, Alemania.
- [58] Jofré, N. et al. (2019). Plataforma para repositorios digitales 3D de colecciones biológicas. En XXV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación. Río Cuarto, Argentina.
- [59] De Freitas, V. y Yáber, G. (2015). Una propuesta de arquitectura para los sistemas informáticos de gestión del conocimiento en instituciones de educación superior. *Espacios*, 36(2), 34-48.
- [60] Moscoso, O., Paredes, J. y Luján, S. (2019). Enterprise architecture, an enabler of change and knowledge management. *Enfoque UTE*, 10(1), 124-132.

Jair Reinaldo Camacho-Serrano
Sara Marcela Pavas Madrid
Liliana González-Palacio
María Clara Gómez-Álvarez
Universidad de Medellín
Colombia

Actualmente, las metodologías ágiles han cobrado gran importancia en el desarrollo de proyectos de software. En las empresas resulta fundamental que los futuros ingenieros conozcan la forma de abordar proyectos ágiles. Por esta razón, las universidades buscan constantemente la mejor manera de enseñar a sus estudiantes y prepararlos para la vida laboral. Una de las tendencias en la enseñanza de ingeniería del software es buscar alianzas con las empresas de manera que se logre simular lo mejor posible, situaciones reales del entorno. En este capítulo se presenta un diagnóstico inicial sobre la forma en que se hacen actualmente las interacciones entre academia e industria, para generar en cursos de ingeniería del software proyectos de aula que vinculen necesidades propias del sector, siguiendo para ello las dinámicas impuestas por las metodologías ágiles de desarrollo. El análisis permite concluir cuáles son los enfoques ágiles más usados en la actualidad para aplicarlos en los cursos. También se menciona la percepción de los estudiantes, de la industria y de la academia frente a ejercicios de aula con este componente de relacionamiento universidad-empresa. Los resultados permiten concluir que la apuesta por recrear escenarios reales es bastante prometedora y mejora el rendimiento de los estudiantes, a la vez que disminuye los índices de deserción.

1. INTRODUCCIÓN

Es un reto para la educación estar a la vanguardia de los procesos que cambian constantemente con el día a día para proveer conocimientos actualizados y acordes a los requerimientos de la industria. En la enseñanza de desarrollo de software se debe estar en una constante actualización de conocimientos para estar a la vanguardia de las tecnologías emergentes y entregar a la sociedad profesionales con las competencias adecuadas para ajustarse y ser competentes a los requerimientos de las empresas. En las empresas de desarrollo de software se ha venido desarrollando una nueva cultura con el fin de brindar a los desarrolladores un buen ambiente de trabajo que propicie calidad y agilidad en el desarrollo de software. Esta cultura comienza directamente desde los desarrolladores y cómo desarrollan sus habilidades, es por esta razón que la mayoría de empresas de software buscan y están en un constante entrenamiento de las habilidades blandas de las personas. Las empresas buscan entonces trabajo en equipo y realizar conexiones profesionales y personales constantemente, transparencia en el trabajo, programar de una forma limpia, transmitir conocimiento, establecer comunicación adecuada entre usuarios y clientes [1].

Si esta cultura se comienza a desarrollar desde la enseñanza de ingeniería del software, los nuevos ingenieros estarán preparados para enfrentar cargos en industria más fácil, disminuyendo la curva de aprendizaje y adaptación, y disminuyendo la probabilidad de fracaso laboral [2]. La academia, consciente de lo anterior, está buscando cerrar la brecha de adaptación a la vida laboral, trabajando desde el aula con proyectos ligados directamente a necesidades expresadas por empresas de software [2]. Pero este proceso de conectar la industria con la academia no es trivial, y requiere un análisis continuo para buscar puntos de mejora, y lecciones aprendidas. En este trabajo se presentan los hallazgos de una exploración inicial sobre las metodologías y buenas prácticas que se encontraron en la literatura en relación con la ejecución de proyectos de aula asociados a desarrollo de software en entornos académicos y empleando metodologías ágiles, con el componente adicional de alianzas con el sector productivo.

2. MÉTODO

Los resultados reportados en este capítulo se generaron a partir de la aplicación del protocolo de revisión de sistemática de literatura propuesto por Kitchenham [3] y otros (Figura 1).

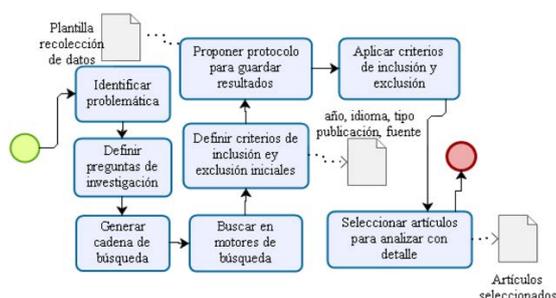


Figura 1. Metodología para la revisión de literatura

Las preguntas de investigación que guían esta exploración son:

1. ¿Qué metodologías ágiles se han implementado para desarrollar proyectos de software en el aula de clase y cómo se han adaptado estas metodologías a los cursos para ayudar a los docentes en el proceso de enseñanza en un contexto de trabajo colaborativo entre universidad - empresa?
2. ¿Cuál es el impacto en los estudiantes de cursos universitarios de ingeniería del software de participar en proyectos de software en el aula, planteados bajo un problema de una empresa del sector y cómo puede influir en la deserción del programa?
3. ¿Cuáles son los principales beneficios que pueden obtener las empresas al participar en el proceso de enseñanza de estudiantes de cursos universitarios de ingeniería del software y cómo esto impacta en esta industria?

Las bases de datos usadas para dar respuesta a los interrogantes anteriores son: Science Direct, Google Scholar, Ebsco, IEEE Xplore Digital Library, ACM (Association for Computing Machinery). Las cadenas de búsqueda empleadas se presentan en la Tabla 1 y los resultados en la Figura 2.

Tabla 1. Cadenas de búsqueda usadas en las bases de datos seleccionadas

Cadena	Cadena de búsqueda
A	Interaction between university and company developing software projects
B	Teaching agile methodologies in universities
C	Agile methodology and university education and classroom project and software and companies

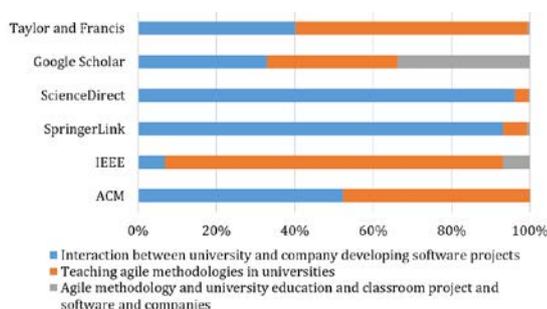


Figura 2. Resultado de la ejecución de las cadenas de búsqueda en las bases de datos seleccionadas

2.1 Criterios de inclusión

- CI1: artículos publicados en el periodo 2015-2020.
- CI2: artículos en los que se abordan proyectos de ingeniería del software propuestos por empresas.
- CI3: artículos que exponen una solución lograda a partir del uso de metodologías ágiles
- CI4: artículos donde se discute retroalimentación de la relación entre empresa y academia.
- CI5: artículos escritos en idioma español o inglés.
- CI6: artículos para conferencias o para revistas indexadas.

2.2 Criterios de exclusión

- CE1: artículos que mencionen metodologías ágiles, pero, que no las utilicen en el contexto de universidad ni de aprendizaje basado en proyectos.
- CE2: estudios publicados antes del año 2015.
- CE3: investigaciones que se enfocan a la aplicación de metodologías ágiles en ambiente laboral sin vincular procesos de enseñanza/aprendizaje.
- CE4: artículos escritos en idiomas diferentes a español o inglés.
- CE5: contribuciones de otros tipos como capítulos de libro, libros, material gris.

Luego de la búsqueda y el filtrado se eligió un conjunto de artículos de los cuales, en la Tabla 2, se presentan las contribuciones más representativas.

Tabla 2. Subconjunto representativo de artículos seleccionados para el análisis

Referencia	Año	Autor
E1	[4]	2020 Ju, A., Hemani, A., Dimitriadis, Y., & Fox,
E2	[5]	2018 Lyra, K. T., Alves, M.L., Silva, F. H. C., Souza, K., & Isotani, S.
E3	[6]	2018 Butgereit, L.
E4	[7]	2017 Fitsilis, P., & Lekatos, A.
E5	[8]	2017 Buffardi, K., Robb, C., & Rahn, D.
E6	[9]	2016 Steghöfer, J. P., Knauss, E., Alégroth, E., Hammouda, I., Burden, H., & Ericsson, M.
E7	[10]	2015 Rodriguez, G., Soria, Á., & Campo, M.
E8	[11]	2015 Bruegge, B., Krusche, S., & Alperowitz, L.
E9	[12]	2015 Anslow, C., & Maurer, F.
E10	[13]	2014 Goñi, A., Ibáñez, J., Iturrioz, J., & Vadillo, J. Á

Una vez seleccionados los estudios primarios se procedió a la extracción de información detallada, con ayuda del formulario presentada en la Tabla 3 (se presenta mediante un ejemplo de diligenciamiento), donde la información fue dividida en tres partes principales: 1) Información general del artículo (contiene los metadatos del artículo como título, autores, palabras clave, base de datos donde se obtuvo, año de publicación y link de acceso; 2) Resultados objetivos (sección clave de la extracción donde se obtiene la mayor cantidad de información relevante para responder las preguntas de investigación; se extrae el problema planteado en el artículo, metodologías ágiles usadas, adaptación de estas metodologías al aula, universidades y empresas implicadas, información del grupo de muestra, información de la deserción estudiantil y de los beneficios para las empresas; y 3) Resultados subjetivos donde se recopila la apreciación de los revisores sobre la información extraída.

Tabla 3. Plantilla para extracción de información artículo seleccionado

Información general			
Título	What Agile Processes Should We Use in Software Engineering Course Projects?		
Autores	Ju, An. Hemani, Adnan. Dimitriadis, Yannis. Fox, Armando		
Palabras clave	Software engineering; Agile; project-based learning	Año de Publicación	2020
Base de datos	ACM	Fuente	ACM
Fecha Revisión	18/04/2020	Revisores	Sara Pavas - Jair Camacho
Link	https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3328778.3366864		
Resultados objetivos			
Problema planteado: Los cursos basados en proyectos de software ofrecen la oportunidad de aprender tempranamente aquellos conocimientos o experiencias que son aprendidas en la práctica. Queriendo adaptar la metodología XP en el aula, se evidencia que no es posible adaptar el proceso completo debido a las limitaciones que se tienen en la enseñanza y las características del curso lo que obliga a los docentes a tomar la decisión de cuales procesos elegir y cuáles deben ser adaptados a las circunstancias del aula. En este artículo se quiere mostrar la mejor forma de tomar estas decisiones para que no sean de forma arbitraria, se cree que el proceso debería ser completo respecto a la taxonomía establecidas por esta razón el estudio es basado en dar conocer a los docentes un método para tomar estas decisiones y adaptaciones bajo un proceso profesional.			
Metodologías ágiles usadas: Professional Agile (eXtreme Programming, XP)			
Adaptación de la metodología a la academia: Adaptación de procesos observados en la industria. Basados en la observación del trabajo de los equipos en la compañía se categoriza los procesos en tres fases, cada uno de los procesos se le es asignado un puntaje. Luego es elegido un proceso de cada categoría, exactamente el proceso con mayor nivel de importancia. Basados en esto se elige para realizar un caso de estudio en un curso estos procesos: Iteration Planning Meeting (IPM), Standup y Retrospective.			
Universidades vinculadas: University of California			
Empresas implicadas: Pivotal 1 is a US-based company			
Grupo de estudio: Observación del trabajo típico en una iteración de 3 equipos de Pivotal con diferentes niveles de madurez. Entrevistas a 4 empleados de la empresa. Luego se realiza el caso de estudio en un curso de ingeniería del software con 120 estudiantes en 20 equipos.			
Impacto deserción estudiantil: Los estudiantes siguieron el proceso y se mostraron de acuerdo sobre con las nuevas herramientas agregadas. Se adaptaron fácilmente y luego de varias iteraciones ya se volvió natural el proceso. Con la adaptación del nuevo diseño del curso los estudiantes obtuvieron mejores notas que el semestre anterior.			
Beneficios para las empresas: Pivotal es uno de los líderes en metodología XP han adoptado y desarrollado herramientas para seguir esta metodología, la adaptación de XP a la academia ayuda a dar una noción de lo que es y ayuda a que los estudiantes se sientan seguros de usarla, así no se siga en principio rigurosamente con la metodología.			
Motivadores para las empresas: N/A			
Impacto para la industria del software: Los equipos de estudiantes pueden beneficiarse de los nuevos procesos como equipos profesionales, y los estudiantes reconocen la utilidad y el valor de estos procesos			
Proyecto de software resultante: N/A			
Resultados subjetivos			
Preguntas de investigación: ¿Interfieren los nuevos procesos con las oportunidades de aprendizaje que se ofrecen por procesos ya presentes en el curso? y ¿Aprecian los estudiantes la utilidad y los valores de los nuevos procesos para el desarrollo del XP? En el caso de estudio se adaptó la metodología al curso, agregan más herramientas y teniendo en cuenta las limitaciones de un curso. También se compara con un curso anterior, donde se había adoptado el nuevo diseño. Hablan que a pesar que el proceso se realizó para la metodología XP es fácilmente aplicable a otras metodologías ágiles.			

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los criterios de comparación definidos para el análisis sistemático de la información recopilada (Tabla 4). Luego se procedió a construir una matriz con toda la información de los estudios analizados usando como guía la tabla anterior. Dicha matriz permitió resolver las preguntas de investigación planteadas al inicio, tal como se explica en las siguientes subsecciones.

3.1 Metodologías ágiles y adaptación de estas a cursos de ingeniería del software

Los estudios analizados presentan a SCRUM como la metodología ágil más utilizada en el aula (Figura 3), le sigue XP junto a Tornado y otras 3 metodologías ágiles que presentaron buenos resultados (*Design Science Research, Lean*

Startup y Kanban). Los estudios que implementaron Scrum, el 50% usó únicamente a Scrum, un 25% usó Scrum junto con otras metodologías y el 25% restante se utilizó junto con XP y Ruby Tornado (Figura 4).

Tabla 4. Criterios de comparación

Criterio de comparación	Descripción	Posibles valores
C1. Metodologías ágiles	Metodologías ágiles usadas en la adaptación a los cursos de aula	Scrum, XP, Kanban, <Otra>
C2. Adaptación metodología	Menciona información sobre adaptación de la metodología en el aula, descripción de los roles y adaptación a los participantes del curso y herramientas utilizadas	Paso a paso, Roles, Herramientas
C3. Información de los proyectos	Los proyectos trabajados en el aula son suministrados por la empresa, son problemas reales, proyectos adaptados al aula, proyectos propuestos por los estudiantes	Empresa, Reales, Adaptados, Propuestos por los estudiantes
C4. Interacción Universidad-Empresa	¿Existe interacción directa entre los participantes del curso y miembros de la empresa implicada?	SI, NO, N/A
C5. Respuesta de los estudiantes	¿Cómo es la respuesta de los estudiantes hacia el curso con la nueva adaptación de la metodología?	Positiva, Negativa, Neutra
C6. Beneficio Empresa	¿Cuál es el beneficio que perciben las empresas por trabajar en estrecha relación en estos cursos universitarios?	Talento, Económico, Adaptación, Conocimiento, Entrenamiento

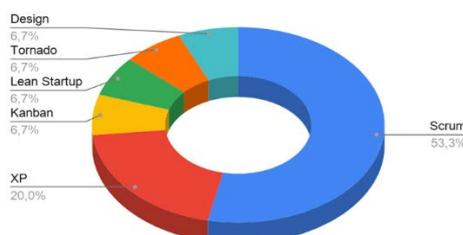


Figura 3. Metodologías ágiles adaptadas en el aula

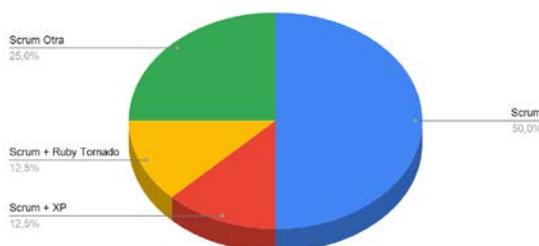


Figura 4. SCRUM junto con otras metodologías ágiles

Una vez identificadas las metodologías ágiles usadas en el aula, se procedió al análisis de su adaptación, tomando como base los criterios de comparación definidos en la Tabla 4. En la mayoría de los estudios recomiendan poner especial atención a la distribución de roles entre el equipo de estudiantes, vinculando por supuesto al docente y al representante de empresa. Mencionan al *SCRUM master* y al *Product Owner*, roles que, según los estudios, pueden también ser asumidos por estudiantes. En un estudio específico donde se mezclaban pregrado y posgrado, los roles de manager fueron adoptados por los estudiantes de posgrado mientras que los estudiantes de pregrado adoptaron el rol de equipo de desarrollo. Esta definición de roles es de gran ayuda para los docentes en el momento de adaptar la metodología, por lo que se identifica como un recurso clave en la adaptación de las metodologías en el aula.

En los estudios también detallan el paso a paso de la adaptación de la metodología. Todo lo referente a definición de los elementos clave de la metodología, ceremonias, desarrollo de los proyectos y retroalimentación. Por último, en algunos estudios describen las herramientas usadas para hacer seguimiento al día a día de los proyectos bajo las metodologías usadas. En la Figura 5 se especifica en qué porcentaje los estudios analizados abordaron los 3 aspectos mencionados en el criterio 2 de comparación (roles, paso a paso, herramientas), y cuáles se concentraron algunos de ellos. El 40% de los artículos integran todos los elementos. El 70% muestran que es importante tomar estos criterios en conjunto, entre más descriptivo es el proceso de adaptación es de más ayuda para llevarlo al aula.

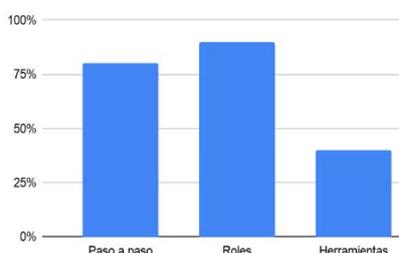


Figura 5. Aspectos claves en la adaptación de metodologías ágiles en el aula

3.2 Impacto de la participación de los estudiantes en proyectos ágiles definidos en un contexto Universidad-Empresa

Este estudio se centra en un contexto donde existe la interacción entre empresas y la academia en proyectos de desarrollo de software. La unión de estos sectores se logra proponiendo proyectos reales en su mayoría definidos por la empresa en cuestión y el desarrollo de los mismos durante el despliegue de cursos universitarios de ingeniería del software. También se debe garantizar la implementación de metodologías ágiles con el objetivo de replicar las prácticas que son comunes en un entorno real de trabajo de la industria software.

En los análisis se detectó que las empresas implicadas eran del sector del software y en otras ocasiones se trataba de la misma Universidad bajo el rol de cliente y empresa planteando necesidades de software en su dinámica normal (desde las unidades dedicadas a desarrollo de software). Es así como el 60% de los estudios analizados muestra una interacción directa entre Universidad y Empresa (Figura 6). En el 40% restante no hay interacción con industria software, aunque si se plantean necesidades reales al interior de las universidades. Estos casos pseudo-reales generan un impacto negativo en los estudiantes y menor interés por el proyecto.

Con lo anterior en mente, es posible dar respuesta a las dos preguntas de investigación restantes. La adaptación de la metodología en el aula y la existencia de una interacción real entre la universidad y la empresa a partir de proyectos reales. Los estudios primarios muestran una respuesta positiva por parte de los estudiantes. Ellos identifican un valor agregado significativo al incluir en su proceso de formación este tipo de experiencias donde tratan con clientes reales, defienden sus desarrollos, aprenden sobre metodologías que se están aplicando en empresa, asumen los roles y se empoderan, integran habilidades técnicas y blandas, logran comunicación real para la elicitación de requisitos, entre otras lecciones aprendidas.

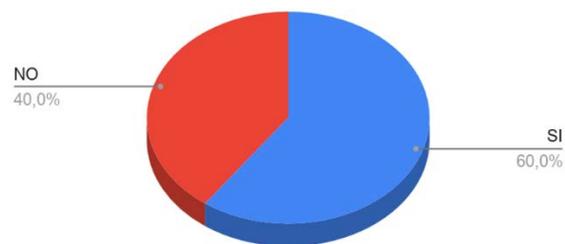


Figura 6. Interacción directa entre universidad y empresas

Como se muestra en la Figura 7, el 50% de los estudiantes consideran que se trata de una experiencia positiva. En contraste, el 20% de los estudios muestran una respuesta neutra frente a la experiencia. La percepción inicial es positiva, sin embargo, al avanzar el curso se fue perdiendo el interés por los proyectos, sobre todo en los casos donde la empresa se desvinculaba y no hacía seguimiento a los trabajos. En los casos donde hubo cercanía con la empresa todo el tiempo, la motivación de los estudiantes siguió y hubo excelentes resultados.

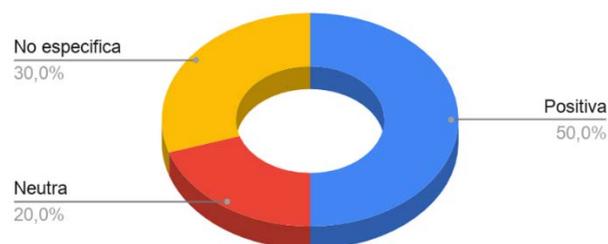


Figura 7. Respuesta de los estudiantes ante el curso

Cabe también anotar que la adaptación de metodologías ágiles en proyectos de software trabajados en el aula en conjunto con empresas, impacta directamente en la deserción estudiantil. Los estudios muestran que más estudiantes aprobaron y terminaron el curso. Así mismo se aumentó la nota promedio de aprobación del curso.

3.3 Beneficios para las empresas de hacer parte del proceso

En los estudios donde se evidenció la relación directa entre universidad y Empresa se muestra que los beneficios no son solamente para la academia. Esta relación es uno a uno donde cada una de las partes aporta y recibe. Al hacer parte de este proceso las empresas no solo aportaron sus proyectos, sino que también encontraron beneficios de hacer parte de los procesos en cada fase. En la Figura 8 se muestran los diferentes beneficios obtenidos. Un 60% de los estudios se refiere a una mejora en los procesos de adaptación de los nuevos empleados, mientras que el 40% resalta que la experiencia a manera de entrenamiento por parte de los estudiantes cuando aún están formándose es positivo. Esto es un atractivo para la empresa ya que minimizan sus tiempos capacitación, adaptación a los equipos y a la forma de trabajo.

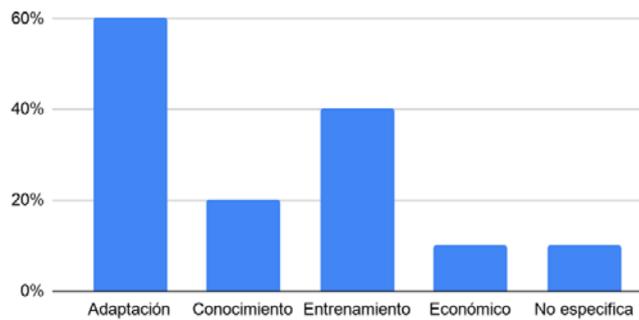


Figura 8. Beneficios para las empresas

Otro de los beneficios que enuncian desde la empresa es ampliar su base de conocimiento. Las empresas reciben directamente de la académica conocimiento para resolver sus problemas y generar proyectos de mejor calidad. Finalmente se reportan también beneficios económicos. Las empresas reciben disminución en impuestos por dar la oportunidad a estudiantes universitarios y que ellos reciban de primera mano la experiencia de trabajar con metodologías ágiles en proyectos reales.

En términos generales, las empresas obtienen beneficios interesantes. La adaptación y talento son los más comunes, situación que las empresas aprovechan para reclutar talento y brindar su primer empleo a los estudiantes. En la Figura 9 se presentan los beneficios compuestos manifestados por las empresas en los artículos revisados en la presente exploración.

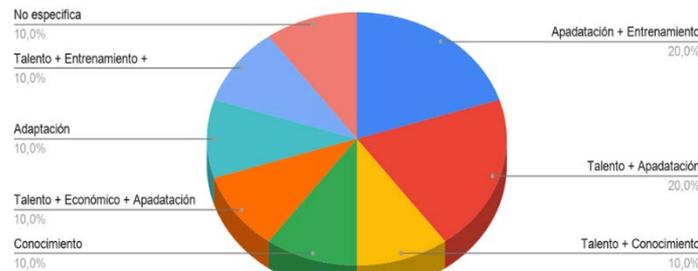


Figura 9. Beneficios compuestos para las empresas

4. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo es explorar de forma preliminar proyectos de aula que se estén ejecutando actualmente en el área de ingeniería del software, y que vinculen dos elementos centrales: interacción con la empresa y metodologías ágiles de desarrollo.

Adicional a esto, también se deseaba conocer el impacto que esta nueva forma de enseñanza generaba en los estudiantes y cómo esto influye en la deserción estudiantil para programas de pregrado del área. Además, en búsqueda de fortalecer y conservar la relación en el tiempo entre la academia y las empresas involucradas se indaga acerca de los beneficios que reciben las empresas de hacer parte de este proceso formativo.

Los resultados obtenidos en este análisis mostraron a SCRUM como la metodología ágil más utilizada para adaptar en el aula, junto con XP y Ruby Tornado los cuales arrojaron muy buenos resultados para adaptar la enseñanza de estas metodologías en cursos de software que impliquen trabajo en conjunto con universidad y empresa.

Independiente de la metodología a implementar es importante conocer una vista general del paso a paso de este proceso de adaptación en el aula. Se resalta la necesidad de conocer la teoría, y buscar su adaptación a entornos reales, donde muchos supuestos se deben reevaluar y convertir los procesos para que sean viables desde la óptica de las empresas. Otro elemento clave es la distribución de los roles y cómo los participantes del curso pueden asumirlo. Los estudios analizados recomiendan que estos roles pueden ser asumidos por los mismos estudiantes teniendo en cuenta las habilidades de los mismos. Por último, en el aula se puede hacer uso de herramientas que ayuden a la gestión de los equipos y de las tareas asignadas para lograr el desarrollo de los proyectos.

En cuanto a la relación con las empresas y la universidad, los resultados obtenidos fueron positivos cuando se trabaja en proyectos reales y la industria se vincula durante todo el proceso, haciendo parte activa en cada fase. Cuando la empresa actuaba como cliente y estaba en constante interacción con el desarrollo del proyecto los estudiantes se mostraron interesados y comprometidos todo el tiempo. Esto se reflejó en un aumento de la nota promedio de aprobación de los cursos y una disminución en la cantidad de desertores ya que los estudiantes continuaron hasta completar el curso, aprovechando esta experiencia para tener su primer acercamiento a un entorno laboral.

Por último, las empresas aportaron con proyectos reales y recibieron diferentes beneficios, principalmente adaptación de los estudiantes a las metodologías ágiles convirtiendo esto en minimización de tiempos de entrenamiento a futuro en el entorno laboral. Así mismo, la industria recibe conocimiento desde la academia, lo cual aporta gran valor a su trabajo y productos debido a que aumenta la calidad y mayor entendimiento de los problemas presentados en el día a día.

REFERENCIAS

- [1] Verwijs, C. (2019). What makes a developer culture? Recuperado: <https://www.scrum.org/resources/blog/what-makes-developer-culture>.
- [2] Gonzalez, L. (2019). Transformación de la enseñanza para innovar en la incorporación de retos reales durante la formación de ingenieros de sistemas a partir de la interacción universidad-empresa. Bogotá.
- [3] Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. Keele University.
- [4] Ju, A. et al. (2020). What agile processes should we use in software engineering course projects? En 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education. Portland, USA.
- [5] Lyra, K. (2018). An agile project management experience: Points of view of graduate students. ACM International Conference Proceeding Series, 45, 10-22.
- [6] Butgereit, L. (2018). Teaching scrum by doing scrum in internships in South Africa to prepare interns for agile projects. Advances in Intelligent Systems and Computing, 738, 221-224.
- [7] Fitsilis, P. y Lekatos, A. (2017). Teaching software project management using agile paradigm. ACM International Conference Proceeding Series, 52, 1-6.
- [8] Buffardi, K., Robb, C. y Rahn, D. (2017). Learning agile with tech startup software engineering projects. Annu. Conf. Innov. Technol. Comput. Sci. Educ. ITiCSE, F1286, 28-33.
- [9] Steghöfer, J. et al. (2016). Teaching Agile: Addressing the conflict between project delivery and application of Agile methods. En 38th International Conference on Software Engineering Companion, Madrid, Spain.
- [10] Rodriguez, G., Soria, Á. y Campo, M. (2015). Virtual Scrum : A teaching aid to introduce undergraduate software engineering students to scrum. Comput. Appl. Eng. Educ., 23(1), 147-156.
- [11] Bruegge, B., Krusche, S. y Alperowitz, L. (2015). Software engineering project courses with industrial clients. ACM Trans. Comput. Educ., 15(4), 1-31.
- [12] Anslow, C. y Maurer, F. (2015). An experience report at teaching a group based agile software development project course. En 46th ACM Technical Symposium on Computer Science Education, New York, USA.
- [13] Goñi, A. et al. (2014). Aprendizaje Basado en Proyectos usando metodologías ágiles para una asignatura básica de Ingeniería del Software. En XX Jornadas de Enseñanza Universitaria de la Informática. Oviedo, España.

Estimación y priorización de requisitos no-funcionales para desarrollo de software: Estado del arte

María José Salamea¹
Liliana González-Palacio²
Marc Oriol¹
Carles Farré¹

¹Universitat Politècnica de Catalunya, España

²Universidad de Medellín, Colombia

Los requisitos de calidad (también llamados requisitos no-funcionales) son aquellos que permiten asegurar la calidad del software. Incluyen aspectos muy diversos, como disponibilidad, seguridad, rendimiento, escalabilidad, portabilidad y usabilidad, entre otros. Los continuos avances tecnológicos, como el software en la nube o el Internet de las Cosas, presentan nuevos retos en el desarrollo del software para poder garantizar un nivel de calidad satisfactorio de dichos aspectos. Asimismo, las metodologías de desarrollo ágil, cuyo uso viene en aumento, tales como SCRUM, XP, Kanban, no dan el soporte necesario para la gestión de dichos requisitos de calidad. Con el fin de facilitar a los ingenieros del software la toma de decisiones sobre el nivel de calidad necesario en un proyecto, es imprescindible conocer de antemano: 1) qué criterios se van a tener en cuenta para verificar, priorizar, planificar y/o negociar los requisitos de calidad. Asimismo, es necesario: 2) precisar cómo se van a evaluar dichos criterios, y 3) identificar qué factores del contexto del proyecto pueden afectar dicha evaluación. Para intentar dar respuesta a estas 3 cuestiones o preguntas de investigación, los autores de este capítulo han diseñado y están llevando a cabo un estudio sistemático de la literatura. Este trabajo presenta para su discusión la descripción de la metodología seguida en ese estudio, así como algunos de los resultados preliminares obtenidos durante su ejecución.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad del software es un elemento fundamental para garantizar el éxito de un proyecto software, así como un factor competitivo esencial en las empresas que lo desarrollan [1]. El estándar ISO/IEC 8402:1994 define la calidad del software como *la totalidad de características de un producto o servicio que le confieren su aptitud para satisfacer necesidades establecidas o implícitas* [2]. Dicha calidad engloba diversas características (p.e. seguridad, disponibilidad, rendimiento, etc.) y dichas características suelen estar organizadas bajo la estructura de modelos de calidad, definidos a su vez como la especificación de las características requeridas que un sistema software debe exhibir [3].

Los estudios de mercado muestran un incremento continuado de la proporción de presupuesto destinado a tratar con la calidad del software. Por ejemplo, un informe de la compañía Capgemini reportó que el gasto en el aseguramiento de la calidad y las pruebas de software en compañías tecnológicas, subió del 18% en 2012 al 26% en 2017 [4]. Este incremento se ve justificado debido al impacto que tiene la calidad del software sobre los negocios de las compañías que lo utilizan en sus productos y servicios. Son recurrentes las pérdidas económicas por software defectuoso o de mala calidad. Por ejemplo, la compañía de software Tricentis identificó y analizó 606 casos de graves fallos en software durante el 2017 y estimó que causaron más de 1.7 billones de dólares (USD) en pérdidas [5].

Para mejorar y asegurar la calidad, algunas aproximaciones argumentan que es necesario tratar dicha calidad explícitamente desde el principio mediante su formalización en requisitos [6]. Los requisitos de calidad (también llamados requisitos no-funcionales) son características, condiciones o restricciones con los que los ingenieros del software garantizan el correcto funcionamiento de un aplicativo. Los requisitos de calidad incluyen aspectos muy diversos, tales como disponibilidad, seguridad, rendimiento, escalabilidad, portabilidad, etc. Los nuevos métodos de desarrollo ágil de software (p.e. XP, Scrum, Kanban) abren paso a nuevos retos para poder garantizar un nivel de calidad satisfactorio de dichos aspectos [7].

Entre los distintos retos que existen para considerar y definir los requisitos de calidad en los entornos de desarrollo ágil, está la dificultad de poder estimar el esfuerzo de desarrollo necesario para alcanzar determinados niveles de calidad, así como la priorización de los requisitos de calidad. Ambas actividades, estimación del esfuerzo de desarrollo y priorización, son imprescindibles durante la fase de ingeniería de requisitos para llevar a cabo una verificación más precisa, una negociación mejor informada y una planificación más apropiada de los requisitos de calidad de un proyecto software.

Por un lado, la estimación del esfuerzo de proyectos de software es el proceso de predecir el esfuerzo requerido para desarrollar o mantener un sistema de software [8]. La falla o cambio en una estimación puede afectar al proceso de implantación, y esto puede generar un impacto en el costo del mismo [9]. Por ejemplo, puede conllevar a una mala asignación de recursos, retrasos y sobrecostos respecto a la planificación inicial [10].

De otro lado, la priorización de requisitos es la determinación de cuáles, entre un grupo de requisitos, se implementarán primero y el orden de dicha implementación [1, 11]. La priorización de qué requisitos deben ser incluidos en cada iteración del producto es un complejo proceso de decisión multicriterio que suele implicar llegar al

equilibrio entre el beneficio para el negocio de cada requisito y el consumo de recursos. Dicha problemática se presenta cuando las necesidades de los clientes deben ajustarse a la capacidad de trabajo del equipo de desarrollo [12]. Ambas actividades están muy ligadas. Por ejemplo, la estimación del esfuerzo para implementar un requisito puede ser un factor determinante en su priorización, asimismo, una mala priorización puede conllevar a un mayor esfuerzo para implementar dicho requisito.

Existen distintos factores y dimensiones a considerar en la estimación y priorización de requisitos, muchos de ellos de carácter cualitativo. A pesar de que existen muchas técnicas de estimación y priorización en desarrollo de software, la mayoría se concentran en analizar los requisitos funcionales, dejando de lado los requisitos de calidad [11].

El objetivo del presente estudio en curso es analizar el estado del arte en cuanto a la estimación del esfuerzo y priorización de requisitos de calidad. Específicamente, interesa descubrir los factores que se deben tener en cuenta para la estimación y priorización de dichos requisitos, así como los mecanismos y herramientas para evaluarlos y qué factores del contexto del proyecto pueden incidir en dicha evaluación. Con todo ello se busca construir una base conceptual sólida que permita posteriormente proponer una técnica para priorizar y estimar el esfuerzo requerido para la implementación de requisitos de calidad en entornos de desarrollo ágil del software.

El resto de este capítulo está estructurado de la siguiente manera: en la sección II se presenta el método seguido para el estudio sistemático. En la sección III se muestra la ejecución del método y algunos resultados preliminares. Por último, en la sección IV se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

2. MÉTODO

El trabajo se estructuró buscando verificar las siguientes preguntas de investigación:

- RQ1 ¿Cuáles criterios son considerados durante la fase de ingeniería de requisitos para elegir los factores de calidad de un producto software específico?
- RQ2 ¿Cómo (herramientas, métodos, modelos) son evaluados estos factores de calidad?
- RQ3 ¿Qué factores del contexto afectan estos criterios?
- Para responder a dichas preguntas se define y ejecuta una revisión de literatura, que es el objeto de este trabajo.

El método seguido es una combinación de las propuestas hechas para la realización de estudios sistemáticos por Kitchenham [13] y Wohlin [14]. La propuesta de Kitchenham [13] está basada en la búsqueda de artículos mediante el uso de palabras clave en múltiples bases de datos. Esto requiere que la comunidad emplee un conjunto de palabras clave de una manera común para poder obtener sus trabajos [15, 16]. En nuestro caso, no existe una terminología estandarizada o consolidada, por lo que una búsqueda utilizando solo la propuesta por Kitchenham resultaría en la pérdida de varios artículos relevantes (*low recall*) si estos no usan los términos empleados en la búsqueda.

Una metodología que no presenta este impedimento, es la propuesta por Wohlin [14]. Dicha propuesta está basada en la técnica del *snowballing*. En esta aproximación se parte de un conjunto de artículos inicial (*seed*) y se obtienen las referencias bibliográficas dentro del artículo (*backward snowballing*), así como los trabajos que citan a dicho artículo (*forward snowballing*) para orientar la revisión de literatura. Las referencias y citas que cumplen con los criterios de búsqueda son añadidos al conjunto inicial, y se procede a nueva iteración, obteniendo más referencias y citas hasta llegar al punto de saturación (esto es, cuando no se encuentran más artículos relevantes).

Esta aproximación no depende de palabras clave, pero al mismo tiempo, tiene también sus inconvenientes. Wohlin [14] no define como obtener el conjunto de artículos semilla, y una mala elección puede llevar a sesgos en los resultados. Para resolver este riesgo, se propone el uso de las pautas definidas en Kitchenham [13] para obtener los artículos semilla que luego guiarán la búsqueda aplicando las técnicas de Wohlin [14], combinando así ambas aproximaciones. El método específico empleado se indica mediante el diagrama BPMN de la Figura 1.

Para la selección de los artículos semilla, según la aproximación de Kitchenham [13], se inicia definiendo la problemática y preguntas de investigación. A partir de aquí, se define una cadena de búsqueda que contenga los términos relevantes para resolver las preguntas de investigación, estructurados mediante los operadores ANDs y ORs. Después de varias iteraciones, se definió dicha cadena de búsqueda como sigue:

(software OR system) AND (requirement prioritization OR requirement validation OR requirement negotiation) AND (factor OR characteristic OR attribute OR criteria) AND (quality OR non-functional OR security OR performance) AND (decision maker OR stakeholder).

Posteriormente, se ingresa dicha cadena de búsqueda en una (o varias) base de datos o motor(es) de búsqueda. En nuestro caso, hemos seleccionado el motor Google Scholar. Al ser el motor que, con diferencia, incluye la mayor parte

de artículos indexados, se ha considerado que no era necesario incluir otros motores u bases de datos. El siguiente paso es la definición de los criterios de inclusión y exclusión para la confección de la lista de los artículos semilla (Tabla 1). Cabe destacar que para la selección de los artículos semilla se ha primado la calidad por encima de la cantidad. En este sentido, se ha decidido limitar los artículos a un conjunto de revistas y congresos de calidad y relevantes en el área.

En particular, se han limitado los resultados a artículos publicados en: *Requirements Engineering*, *IEEE Transactions on Software Engineering*, *IEEE Software*, *Information and Software Technology*, *Journal of Systems and Software*, *Empirical Software Engineering*, *Communications of the ACM*, *Software Quality Journal*, y *Systems Engineering*. Dicha lista de revistas y congresos se ha confeccionado en base a la experiencia y conocimiento previo de los autores.

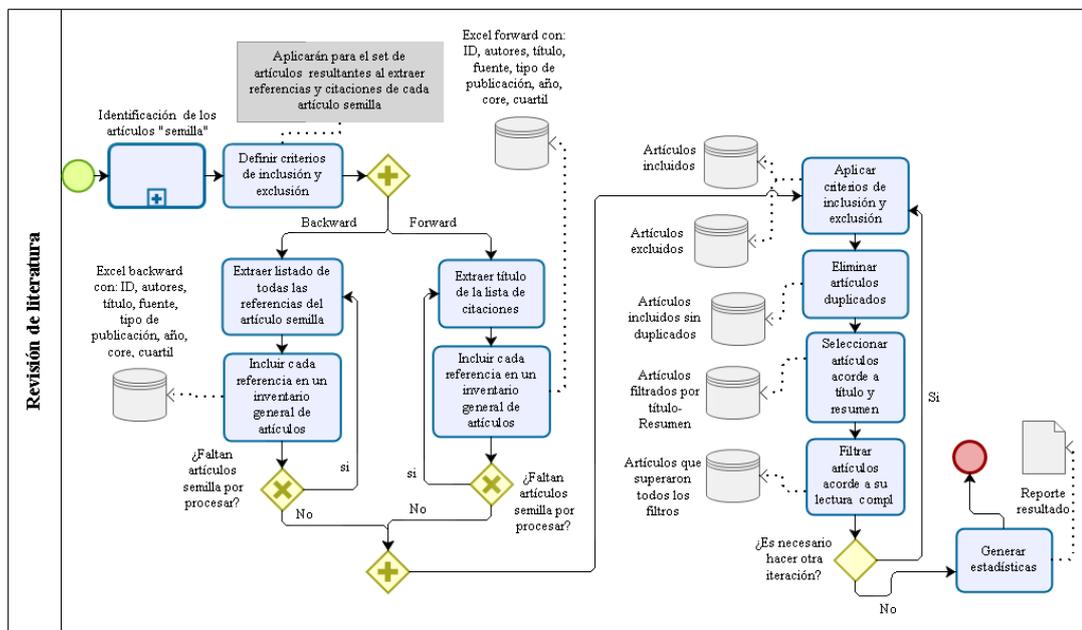


Figura 1. Método para el estudio sistemático

Tabla 1. Criterios para filtrado de artículos semilla

Criterios de Inclusión (CI)	
CI1:	contribuciones publicadas entre los años 1999-2019.
CI2:	artículos escritos en idioma inglés.
CI3:	contribuciones en revistas o congresos de calidad y cuya temática entre dentro del ámbito de las preguntas de investigación.
CI4:	artículos cuyo enfoque estén dentro del alcance de la priorización y estimación de requisitos de calidad en desarrollo de software.
Criterios de Exclusión (CE)	
CE1:	estudios publicados antes del año 1999.
CE2:	artículos escritos en idiomas diferentes al inglés.
CE3:	contribuciones que no estén en revistas o congresos de calidad o cuya temática no entre dentro del ámbito de las preguntas de investigación.
CE4:	artículos cuyo enfoque estén fuera del alcance de la priorización y estimación de requisitos de calidad en desarrollo de software.

Los artículos recuperados mediante Google Scholar se filtran acorde a los criterios definidos en la Tabla 1. En este punto se emplea un protocolo para registrar los artículos encontrados, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Protocolo para extracción de información

Item Type	Publication Year	Author	Title	Publication Title	ISBN/ISSN /DOI	Url	Abstract

En la Tabla 2, *item type* puede ser diligenciado con una de las siguientes opciones: libro, capítulo, conferencia, artículo en revista, reporte, tesis, otro. Con los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos se aplica un primer filtrado para elegir los artículos semilla y comenzar con la aproximación tipo *snowballing*.

En este punto se refinan los criterios de inclusión y exclusión para obtener el listado de artículos que van a formar parte del resultado final del estudio sistemático (Tabla 3). En estos criterios, ya no se limitan los artículos a los congresos o revistas definidas anteriormente, aunque para asegurar la calidad de estos, sí se define como criterio que los artículos deben ser publicados en revistas de primer o segundo cuartil JCR, o en congresos con ranking CORE-A o CORE-A*. Asimismo, se limitan los resultados a aquellos artículos que presentan una propuesta concreta (técnica o método).

Tabla 3. Criterios para filtrado de artículos del estudio

Criterios de Inclusión (CI)
CI1: contribuciones publicadas entre los años 1999-2019.
CI2: artículos escritos en idioma inglés.
CI3: contribuciones en revistas cuyo cuartil sea 1 o 2, o presentadas en eventos con ranking CORE-A o CORE-A*.
CI4: artículos cuyo enfoque estén dentro del alcance de la priorización y estimación de requisitos de calidad en desarrollo de software.
CI5: artículos que detallen técnicas, métodos para priorizar y estimar requisitos de calidad en desarrollo de software.
Criterios de Exclusión (CE)
CE1: estudios publicados antes del año 1999.
CE2: artículos escritos en idiomas diferentes al inglés.
CE3: contribuciones que no estén en revistas cuyo cuartil sea 1 o 2, ni presentadas en eventos con ranking CORE-A o CORE-A*.
CE4: artículos cuyo enfoque estén fuera del alcance de la priorización y estimación de requisitos de calidad en desarrollo de software.
CE5: artículos cuyo enfoque sea la revisión sistemática de literatura o comparativos entre estudios ya realizados.

Con los criterios definidos, se procede a efectuar dos actividades simultáneas: el *backward snowballing* y el *forward snowballing*. En el *backward snowballing* se extrae (por cada artículo semilla) el listado de todas las referencias del escrito. Mientras que en el *forward snowballing* se genera un inventario de las citas que ha logrado cada artículo semilla. Estas dos actividades se repiten acorde al conjunto de artículos semilla o base. Luego se procede a aplicar los criterios de inclusión y exclusión. Posteriormente se eliminan los artículos repetidos entre los listados de citas y referencias de todos los artículos base. Para los artículos seleccionados hasta este punto se diligencia un protocolo de recolección de información.

El *snowballing* se hace en varias iteraciones, tomando la decisión, acorde a los resultados, sobre si es necesario hacer una nueva iteración o finalizar.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se presentan los resultados al seguir la combinación metodológica presentada en la sección anterior. Para la elección de los artículos semilla, se ejecutó la búsqueda en Google Scholar con la cadena de búsqueda definida. Los resultados de dicha búsqueda se presentan en la Figura 2.

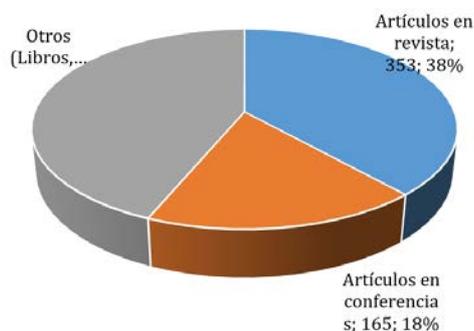


Figura 2. Resultados de la búsqueda inicial

Los 920 resultados se procesaron acorde los criterios de inclusión/exclusión para los artículos semilla definidos en la Tabla 1. En una primera iteración se aplicaron los tres primeros criterios de inclusión/exclusión (CI/CE 1-3), puesto que estos no requieren la lectura del artículo. Al aplicar dichos filtros, quedaron 41 documentos distribuidos en los distintos congresos y revistas seleccionados (Tabla 4).

Tabla 4. Distribución de contribuciones luego del primer filtro

Nombre revista o evento	#
Requirements Engineering	10
IEEE Transactions on Software Engineering	5
IEEE Software	3
Information and Software Technology	4
Journal of Systems and Software	7
Empirical Software Engineering	3
Communications of the ACM	1
Software Quality Journal	1
Systems Engineering	7
Total	41

A estos 41 documentos se les aplicó el cuarto criterio de inclusión/exclusión (CI/CE 4). Primero se procesaron leyendo su título y resumen, resultando en 22 artículos. Por último, se realizó una lectura completa de los 22 artículos, resultando en los 7 artículos semilla que se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Artículos semilla seleccionados

Título	Año
Priority assessment of software process requirements from multiple perspectives	2006
A framework for prioritization of quality requirements for inclusion in a software project	2013
A systematic literature review of software requirements prioritization research	2014
Dynamic decision models for staged software product line configuration	2014
Adaptive Requirements Prioritization (ARP): Improving Decisions between Conflicting Requirements	2015
An industry experience report on managing product quality requirements in a large organization	2017
Understanding requirement prioritization artifacts: a systematic mapping study	2017

Con los 7 artículos seleccionados como semilla se aplicaron las técnicas de *backward snowballing* y *forward snowballing* empleando los criterios de inclusión y exclusión que se enuncian en la Tabla 3.

Asimismo, se diligenció el protocolo para extracción de información detallada que incluye ítems como: palabras clave, país, continente, filiación del autor principal (empresa o academia), aparición de temas como: priorización, negociación, estimación; también se verificó si hacían mención de requisitos de calidad específicos (seguridad, fiabilidad, robustez, entre otros); se extrajeron también las preguntas de investigación de cada artículo, se verificó si había algún tipo de validación en caso que se hicieran propuestas nuevas.

Los resultados del *snowballing* se presentan en las Tablas 6 y 7. En ambas iteraciones se obtuvieron 15 artículos nuevos, resultando 37 artículos en total (7 artículos semilla + 15 artículos primera iteración + 15 artículos segunda iteración). Después de la segunda iteración se constató que al aplicar nuevamente el *snowballing* no se encontró más resultados relevantes, con lo que se dio por concluida la extracción de artículos.

Tabla 6. Resultados del proceso de snowballing - Iteración 1

Primera iteración (Snowballing sobre los 7 artículos semilla)	Backward	Forward
Snowballing antes de aplicar los criterios de inclusión/exclusión	521	449
Artículos resultantes de la aplicación de los criterios CI/CE 1-3	65	116
Artículos resultantes de la aplicación de los criterios CI/CE 4-5 (lectura por título y abstract)	19	17
Artículos resultantes de la aplicación de los criterios CI/CE 4-5 (lectura completa)	7	8
Nuevos artículos al finalizar la iteración		15

Tabla 7. Resultados del proceso de snowballing - Iteración 2

Segunda iteración (Snowballing sobre los 15 artículos semilla)	Backward	Forward
Snowballing antes de aplicar los criterios de inclusión/exclusión	515	449
Artículos resultantes de la aplicación de los criterios CI/CE 1-3	31	116
Artículos resultantes de la aplicación de los criterios CI/CE 4-5 (lectura por título y abstract)	11	17
Artículos resultantes de la aplicación de los criterios CI/CE 4-5 (lectura completa)	7	8
Nuevos artículos al finalizar la iteración		15

Algunas estadísticas relevantes se presentan a continuación. En la Figura 3 se presenta la distribución geográfica de los estudios para identificar en qué país se ha realizado mayor contribución al tema de investigación.

Para este trabajo se identificó el país de afiliación de todos los autores, contabilizando los países involucrados en cada artículo (se contabiliza una sola vez cada país para cada artículo, aunque el artículo tenga dos o más autores del mismo país). En los resultados se observa que el país con mayor número de estudios en el tema es Estados Unidos con 8 publicaciones, seguido de Malaysia con 7.

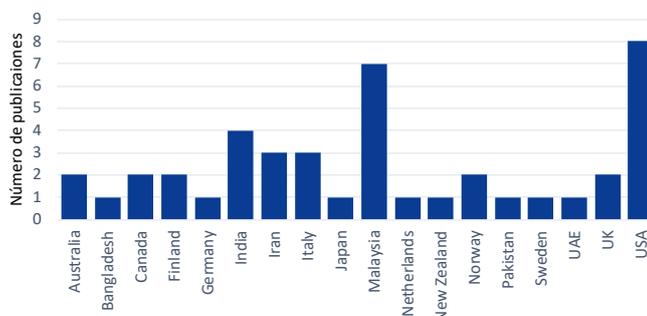


Figura 3. Estadísticas de número de publicaciones por país

Se ha analizado también el porcentaje de artículos según si sus autores provenían del sector académico o industrial (Figura 4). Se evidencia que la mayoría de contribuciones (74%) tienen solo autores académicos. El 24% de los trabajos incluyen una combinación de autores de la industria y académicos, mientras que solo el 2% tiene autores exclusivamente de la industria.

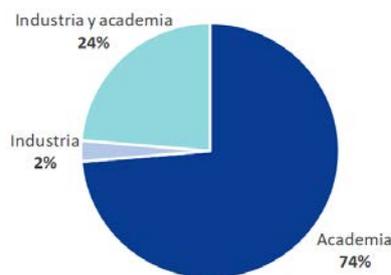


Figura 4. Porcentaje de estudios de acuerdo a la filiación (industria o academia)

En la Figura 5 se muestra la distribución de los artículos revisados por rango de años. Como cabía esperar, se observa que el *backward snowballing* permite obtener los artículos publicados en los primeros años del periodo considerado, mientras que la variante *forward* obtiene los publicados en los últimos años. En términos agregados, los periodos 2004-2009 y 2015-2020 son los más fructíferos ya que registran un mayor número de artículos.

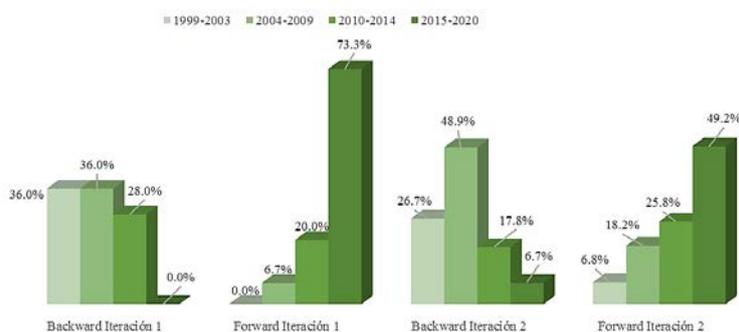


Figura 5. Distribución de artículos por rango de años

En cuanto al tipo de publicación, la Figura 6 muestra un claro predominio de los artículos publicados en revistas frente a los publicados en actas de conferencias. A diferencia del gráfico de la Figura 5, aquí las diferencias en las distribuciones no se observan entre los dos diferentes tipos de *snowballing* sino entre las dos iteraciones. Claramente, en la primera iteración la diferencia entre revistas y conferencias es mucho más abrumadora que en la segunda iteración. Esto puede ser debido a que los artículos resultantes durante la fase de obtención de artículos semilla son mayoritariamente de revista, y estos pueden tener una cierta tendencia a citar más (y ser más citados por) artículos de revista que de congreso. De aquí se desprende la necesidad de ejecutar más de una iteración en el proceso de snowballing, pues se observa que, durante la segunda iteración, dicho posible sesgo es mitigado.

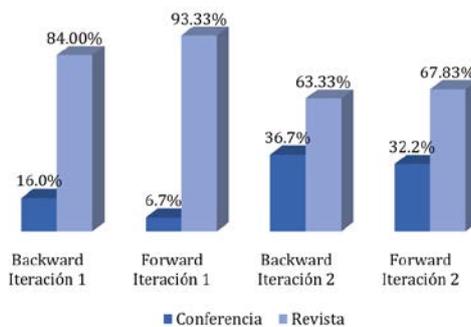


Figura 6. Distribución de artículos revisados acorde al tipo de publicación

Si se analiza con más de detalle la distribución de los artículos dentro de cada categoría y en la Figura 7 se puede observar, por ejemplo, que la mayoría de los artículos de revista pertenecen al primer cuartil. A pesar que hay ligeras diferencias en la distribución de artículos en cada iteración, dichas diferencias no son estadísticamente significantes.

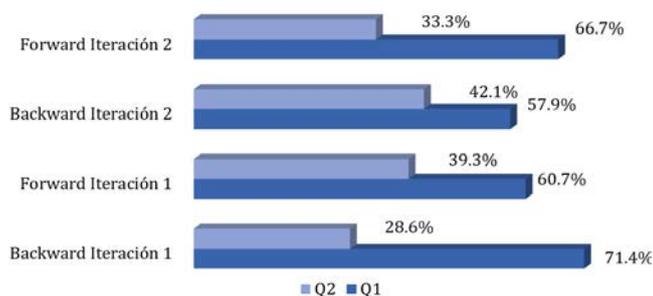


Figura 7. Distribución de artículos en revistas por cuartil

Por lo que refiere a la calidad de las conferencias, en la Figura 8 se observa un claro predominio de artículos publicados en el rango de menor calidad (A) según el índice CORE. Ello no es de extrañar porque, a diferencia de la distribución en cuartiles, la distribución de las conferencias en los rangos del índice CORE no está equilibrada: la proporción de conferencias A es 3.5 veces mayor que la de conferencias A*. En todo caso, no deja de llamar la atención que en la primera iteración no se halle ningún artículo publicado en conferencias de la máxima calidad. Esto puede ser debido a que en la primera iteración se encontraron pocos artículos de congreso (solo 4 artículos de congreso durante el *backward* de la primera iteración y 2 artículos de congreso durante el *forward*). Siendo la proporción de conferencias A 3.5 veces mayor que la de conferencias A*, el hecho de no haber encontrado ningún artículo de congreso A en la primera iteración es consistente con dichas proporciones.

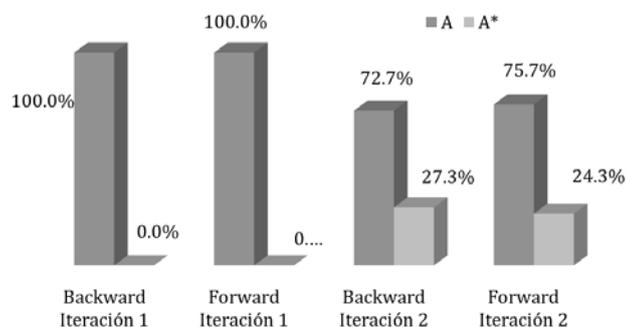


Figura 8. Distribución de artículos en conferencias por ranking

Por último, cabe destacar que en el *wordcloud* la herramienta utilizada (librería *wordcloud* de R) elimina automáticamente un conjunto de palabras habituales y de poca relevancia (*a, and, the, ...*). Además de estas palabras, se han eliminado los siguientes términos por ser también muy habituales y poco relevantes: *achieve, addition, aim, also, although, architectural, available, among, based, can, case, company, considered, different, domain, existing, first, high, large, making, multiple, number, obtained, order, outcome, paper, perspective, phase, phenomenon, presented, problem, proposed, research, results, set, several, show, study, terms, three, two, use, used, using, various*. Se puede observar que la mayoría de los términos presentados fueron usados en la cadena de búsqueda. Lo anterior no implica que estén presentes en la gran mayoría de artículos. Asimismo, aparecen nuevos términos interesantes como, por ejemplo, *satisfaction* y *technical debt*.

4. CONCLUSIONES

En este capítulo se presenta el trabajo en curso de una revisión sistemática de la literatura sobre la estimación y priorización de requisitos de calidad. Para ello se aplicó una combinación de las pautas de desarrollo de estudios sistemáticos de Kitchenham [13] y Wohlin [14]. Mediante la combinación de ambos protocolos, se buscó mitigar los riesgos que planteaba cada una de las aproximaciones por separado. Con la aplicación de las pautas de Kitchenham, se obtuvo una primera lista de artículos de manera sistemática que ha sido luego utilizada como semilla para aplicar el protocolo de *snowballing* de Wohlin. Se ha aplicado tanto *backward snowballing* como *forward snowballing* en 2 iteraciones.

En los resultados de los artículos obtenidos se evidencia que la mayoría de contribuciones provienen de la academia, con un bajo porcentaje de artículos escritos por autores de industria. También se observó que Estados Unidos ha hecho la mayor cantidad de contribuciones al tema de estimación y priorización de requisitos en el rango observado (1999-2019).

Como trabajo futuro se espera finalizar el estudio sistemático mediante la aplicación de técnicas de extracción de datos de los artículos resultantes, así como técnicas de análisis y síntesis sobre dichos datos para poder responder a las preguntas de investigación planteadas.

También se espera aplicar el método descrito en este capítulo en otras áreas de investigación de la ingeniería del software.

REFERENCIAS

- [1] Abbas, N., Gravell, A. y Wills, G. (2010). The impact of organization, project and governance variables on software quality and project success. En Agile Conference. San Diego, USA.
- [2] Howarth, T. y Greenwood, D. (2017). Construction quality management: Principles and practice. Routledge.
- [3] Kabir, M., Rehman, M. y Majumdar, S. (2016). An analytical and comparative study of software usability quality factors. En 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science. Lisboa, Portugal.
- [4] Sogeti. (2017). World Quality Report 2017 – 2018. Recuperado: https://www.sogeti.com/globalassets/global/downloads/testing/wqr-2017-2018/wqr_2017_v9_secure.pdf.

- [5] Tricentis. (2018). Software Fail Watch. Recuperado: <https://www.tricentis.com/resources/software-fail-watch-5th-edition/>.
- [6] Oriol, M. et al. (2019). Data-driven elicitation of quality requirements in agile companies. En International Conference on the Quality of Information and Communications Technology. Boston, USA.
- [7] López, L. et al. (2018). How practitioners manage quality requirements in rapid software development: A Survey. En 1st International Workshop on Quality Requirements in Agile Projects. Madrid, Spain.
- [8] Sehra, S. et al. (2017). Research patterns and trends in software effort estimation. Information and Software Technology, 91, 1-21.
- [9] Naik, P. y Nayak, S. (2017). Insights on research techniques towards cost estimation in software design. International Journal of Electrical & Computer Engineering, 7(5), 235-246.
- [10] Vazquez, P., Panizzi, M. y Bertone, R. (2019). Estimación del esfuerzo del proceso de implantación de software basada en el método de Puntos de Caso de Uso/Estimating the effort of the software implantation process based on the Use Case Points method. Brazilian Journal of Development, 5(2), 1809-1822.
- [11] Ali, A. et al. (2018). Requirements prioritization: A comparison between traditional and agile (Scrum and FDD). En 16th International Conference on Statistical Sciences. Mexico, Mexico.
- [12] Leshob, A., Hadaya, P. y Renard, L. (2019). Software requirements prioritization with the goal-oriented requirement language. In International Conference on e-Business Engineering. Buenos Aires, Argentina.
- [13] Kitchenham, B. y Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering version 2.3. Engineering, 45, 1051-162.
- [14] Wohlin, C. (2016). Second-generation systematic literature studies using snowballing. En 20th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering. Berlin, Germany.
- [15] Budgen, D. et al. (2008). Using mapping studies in software engineering. PPIG.
- [16] Petersen, K. et al. (2008). Systematic mapping studies in software engineering. En 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering. London, UK.

Evaluación de calidad para la fase de diseño de aplicaciones web a partir de un modelo basado en la norma ISO/IEC 9126

Katerine Beleño Caselles
John Timy López Gómez
Miguel Alberto Pinzón Rincón
Universidad Popular del Cesar, Colombia

La academia representada por las instituciones de educación superior donde se forman los futuros desarrolladores de software, debe preocuparse al igual que la industria del software por realizar la gestión de la calidad en el proceso de desarrollo. Las aplicaciones web que es un tipo de producto que conlleva nuevos desafíos y exigencias en los entregables y gestión del mismo, se les debe prestar importancia pues cada día su uso se extiende y las empresas cada vez dependen más de estos proyectos. La fase de diseño es, según Pressman y otros investigadores de la ingeniería del software, la etapa donde más se aplica lo ingenieril de un producto de software y es la que requiere un mayor grado de abstracción por ello es una fase a la cual se le debe dar la importancia que se merece para que los desarrolladores y mantenedores de las mismas tengan un trabajo más fácil. Por ello la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica y su programa de ingeniería de sistemas preocupado por el tema en mención propone a través de una investigación un modelo de medición basado en la norma ISO 9126, por un lado los desarrollos de los proyectos de grado de tipo aplicación web van en incremento y por el otro las políticas de extensión del programa promueven la donación de éstos desarrollos a las empresas de la región, por lo tanto asegurar que por lo menos en una de las fases se ha realizado un análisis de la calidad desde el producto software es deseable. De forma resumida se pretende mostrar un modelo para medir la calidad de los entregables en la fase de diseño de las aplicaciones web desarrolladas por el estudiante del programa de Ingeniería de Sistemas, modelo que resulta de la revisión bibliográfica de los modelos existentes e investigaciones realizadas sobre el tema de las diferentes métricas para éstos entregables y por último y lo más importante la necesidad y claridad por parte del grupo de docentes de qué requerían como productos de calidad en éstos tipos de desarrollo.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de software ha venido cobrando importancia y hoy por hoy es una de las actividades representativas en el sector de servicios. Cada día la miniaturización en los elementos electrónicos que se usan van generando nuevas necesidades de aplicaciones para el usuario final y esto genera que las exigencias sean cada vez mayores en cuanto a su uso y calidad.

Sin embargo, estudios que ha venido desarrollando el StandishGroup (como son los informes CHAOS) grupo éste que trabaja en retomar información de proyectos de aplicación de TI y que genera datos importantes de lo que muchas empresas vienen realizando, la situación que se venía presentando en los fallos de software desarrollados en el año 2001 se debían a casos de atrasos del tiempo estimado, trayendo como consecuencia que muchos de los proyectos no finalizaran a tiempo, algunos no se terminaran, que terminaran con menos de las funcionalidades previstas o con fallos [1].

La situación no ha mejorado en los informes posteriores que han seguido generando y por ello se discute mucho acerca de la calidad del software y las posibles soluciones para mejorar éste tema en particular. Según [2], quién habla del informe CHAOS (2013), el 39% de los proyectos de software terminan satisfactoriamente en los tiempos, costos y funcionalidad inicialmente definida y el 18% de los proyectos fueron cancelados. El informe del 2015 hace una revisión de 50.000 proyectos de TI relacionados con el desarrollo de software y la tendencia es que los proyectos pequeños tienen mayor posibilidad de evitar fallos como también los desarrollos ágiles, los porcentajes en estos casos de proyectos son menores.

En lo referente al desarrollo de software en el ámbito web, se puede afirmar y muchos teóricos como [3] lo confirman, que el desarrollo de aplicaciones para sistemas web tiene diversas características que lo diferencian de un desarrollo de software tradicional. Este tipo de aplicaciones se han vuelto cada vez más complejas en cuanto a estructura, funcionalidad e interfaz. Un estudio realizado sobre los proyectos web describe los siguientes problemas: *el 84% de los proyectos entregados no corresponden a las necesidades del negocio; el 79% de las veces ocurren retrasos en la entrega; el 63% de las veces los proyectos exceden el presupuesto; el 53% de las veces las aplicaciones web entregadas no proporcionan la funcionalidad requerida; el 52% de las veces las aplicaciones web entregadas tienen baja calidad* [1].

Todas estas fallas que se vienen presentando en este tipo de sistemas generan descontento y desconfianza en los sistemas de información web, por lo tanto, el proceso se debe gestionar y dirigir de manera rigurosa y cuantitativa. Por ello: La utilización de principios de medición para evaluar el desarrollo web proporciona una retroalimentación que ayudará a entender, controlar, mejorar y predecir éstos productos y su proceso de desarrollo [1].

Piattini [1] manifiesta que el tiempo, el coste y la calidad son variables del negocio a tener en cuenta en el desarrollo de software y cada desarrollador debe entender la economía y poder determinar el equilibrio óptimo del funcionamiento y el riesgo para su negocio y mercados si no implementa una manera de medir para poder controlar lo que está realizando.

Mantener controlado el producto que se está desarrollando en cada una de las fases es lo ideal en las empresas dedicadas a la producción de software. Sin embargo, la fase de desarrollo del software donde se aplica la ingeniería en toda su dimensión es la fase de diseño. El diseño es una fase esencial, la exigencia de calidad en ésta redundará en el mejoramiento del desarrollo del código y en la disminución del esfuerzo realizado en la fase de mantenimiento y no debemos olvidar que los costos más altos se realizan en esta fase por ello una mejora del diseño nos conlleva una disminución de costes de mantenimiento.

En el ámbito académico de los programas de las Instituciones de Educación Superior que trabajan en torno al desarrollo de software en Colombia, es recomendable tener en cuenta de igual forma el hecho de medir para reconocer el estado de los productos generados y más aún si se está en un proceso de acreditación, es por ello que se busca aplicar en un número considerable de proyectos de grado donde desarrollen aplicaciones para la web éste modelo de medición. En el caso de la Universidad Popular del Cesar, específicamente en el programa de Ingeniería de Sistemas se viene desarrollando proyectos de grados tipificados en aplicaciones para la web y a los cuales es deseable aplicar un modelo de medición en la fase de diseño que ayude a mejorar los índices de calidad de los mismos.

2. MÉTODO

La medición se puede realizar para el proyecto, el proceso y el producto. Este trabajo se centró en los aspectos relativos al producto. Teniendo en cuenta lo antes mencionado, no se tendrá en cuenta la calidad en uso, puesto que estará más direccionado a la calidad interna del producto que a la externa y a la de uso que se menciona en ISO 9126.

2.1 Enfoque Cualitativo

Hernández, et al. [4] afirman que el enfoque cualitativo es el que *utiliza recolección de datos sin medición numérica para descubrir o afinar preguntas de investigación y puede o no probar hipótesis en su proceso de interpretación*. Este estudio se plantea desde un enfoque cualitativo pues pretende soportar sus resultados en evidencias empíricas, brindando la posibilidad de pasar de la casuística, de lo informal a conocimientos más elaborados que permitan generalizaciones, aunque no necesariamente universales, pero si con la posibilidad de aplicarse en contextos similares al del objeto de estudio.

Se logra desarrollar un proceso inductivo al formular posturas teóricas bajo un accionar de explorar y describir algo del objeto de estudio que son los diseños de las aplicaciones web para luego generalizarlo a los proyectos de grado catalogados como tal de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica. Para ello se requiere conocer cuál es la percepción de diseños de calidad para las aplicaciones web y así generar la propuesta. La mayor parte de datos recolectados no serán de medición numérica sino más bien de documentación recolectada para ser analizada y con ellos: realizar la propuesta, aplicarla a tres casos de la Universidad y luego construir un marco de referencia basado en los datos de tipo empírico obtenidos y analizados.

2.2 Alcance descriptivo

Se describió con este proyecto los factores, las características, los atributos y por último las métricas que hacen que una aplicación web sea considerada o no un producto de calidad en su fase de diseño. Y posteriormente plantear un modelo de calidad desde las necesidades de la Institución para luego aplicarlo en algunos de los proyectos de grado desarrollados o en fase de desarrollo. Hernández, et al. [4] definen la investigación descriptiva como el tipo de investigación que *busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice*. Y ese es el caso de esta investigación.

2.3 Diseño del proceso de investigación

El diseño metodológico de esta investigación propuso diversos métodos y técnicas de corte inductivo, sin embargo, se adapta a las circunstancias del contexto durante el desarrollo del estudio, porque así lo permiten los enfoques cualitativos, claro está sin perder el rigor que un trabajo de éste tipo requiere.

2.3.1 Métodos para la consecución del primer objetivo

Para el logro de este objetivo se realizó un recorrido histórico por los diferentes modelos de calidad del producto de software a nivel general hasta llegar a los modelos de calidad del producto definidos para aplicaciones web, con ésta revisión se genera un primer producto que es un capítulo del estado del arte, se describirán sus factores, características hasta llegar a los atributos pues las métricas harían demasiado extenso este objetivo y el fin es conocer qué existe y cómo se aplica cada modelo según el tipo de software para luego realizar una comparación entre éstos modelos y verificar cuáles son las características que más están presentes en todos. De igual forma se describe lo que se considera a nivel de estándares como calidad, diseño y aplicación web para luego tener una certeza de los artefactos de cada aplicación web en fase de diseño sobre los que debería aplicarse la medición, concepto éste del cual también se realizó una claridad. Una vez expuestos todos los conceptos y aplicado el método histórico para los modelos de

calidad del producto y realizada la comparación entre los diferentes modelos se pasará a selección de los artefactos a medir para plantear el modelo para la fase de diseño de aplicaciones para la web en los proyectos de grado de los estudiantes del programa de ingeniería de sistemas de la Universidad Popular del Cesar, Seccional Aguachica.

2.3.2 Métodos para la consecución segundo objetivo

Vistos los diferentes modelos de calidad del producto y los fines de su medición, se inicia la propuesta del modelo sobre el planteamiento de la necesidad de medición de los proyectos de grado enmarcados en aplicaciones web en su fase de diseño en la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica. Se expresa una pregunta alrededor de éste objetivo de medición y luego se plantean las características relevantes que se desean medir.

Paso seguido se deben seleccionar los artefactos a medir en la fase de diseño para delimitar qué medirá el modelo. Una vez se seleccionan éstos artefactos se proponen plantillas para su análisis, esto basado en las características que ya han sido escogidas para la medición. El análisis desarrollado para diseñar las plantillas ayudará a seleccionar los atributos y las métricas de cada atributo por el método de abstracción científica.

Una revisión bibliográfica ayudará de igual forma a revisar los indicadores que se conocen en el medio y sus posibles formas de medición. De aquí se seguirá analizando las mejores formas de plantear los indicadores y los rangos que algunos miembros de la comunidad científica proponen (pues algunos son de tipo empírico y otros de tipo teórico) como una medición que se pueda considerar aceptable en el rango de la calidad que se pretende obtener con este modelo de diseño y de medición.

2.3.3 Métodos para la consecución tercer objetivo

Para validar el nivel de funcionalidad del modelo se pretende aplicar en tres proyectos de grado en fase de diseño que configuren como aplicaciones web. La revisión realizada a los proyectos de la Institución se hizo mediante métodos de revisión documental. Una vez seleccionados los tres proyectos, mediante revisión documental del listado de proyectos de grado que existen en la coordinación de investigación y proyectos se seleccionan tres que se tomarán para la validación. Se verifican los resultados y se hace un análisis de los mismos.

2.4 Fuentes de Datos Consultadas

Se realizó una triangulación de datos de las fuentes consultadas como artículos científicos, libros sobre el tema de calidad, experiencia del docente que dirige los proyectos de grado de la Universidad y enlaces web de interés, así como las recomendaciones y conclusiones de varios trabajos de grado que son aplicaciones web. Esto permitió hacer las posibles confrontaciones y abstracciones para plantear el modelo.

2.5 Instrumentos de captura de información

Se utilizaron varias técnicas para la captura de datos, esto de alguna forma lo permitía la diversidad metodológica que se propuso. Las técnicas son las siguientes:

2.5.1 La técnica de revisión documental

Para la aplicación de esta técnica se utilizó una lista de chequeo que indicara si el proyecto presentaba los entregables de la fase de diseño, la intención es revisar si los proyectos de grado terminados y que se encuentran en la biblioteca entregaron artefactos susceptibles de medir para el modelo. Para la selección del material que sirvió como fuente bibliográfica no se utilizó ningún tipo de herramienta, sólo la observación directa del tema de cada libro o artículo realizando una lectura al prefacio y al resumen de los mismos previamente con esto se podía saber si el documento era importante para la investigación. Para la selección del proyecto en fase de desarrollo se realizó observación directa sobre el cronograma en el formato de anteproyecto a la oficina de investigación y proyectos de la Institución.

2.5.2 La técnica de conversación asociada a la entrevista

Para la aplicación de esta técnica no se utiliza ningún formato específico, lo único que se pretende es conocer los artefactos de diseño que recomienda el docente que dirige los proyectos de grado configurados como aplicaciones web en la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica y qué consideración tiene sobre lo que es un buen diseño para los proyectos.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Esta propuesta no pretende realizar una sugerencia de pasos sucesivos como un método sino proponer un punto de referencia o patrón para que pueda ser reproducido por personal que desee realizar un proceso de medición de

aplicaciones para la web en su fase de diseño, obviamente teniendo en cuenta métricas y algunas propuestas encontradas en el marco teórico y estado del arte.

Se pretende medir a través de indicadores los productos o artefactos entregados en la fase de diseño de los proyectos de grado del programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Popular del Cesar, con base en un modelo que tendrá una estructura que se validará en los proyectos en fase de desarrollo o ya terminados. Esta propuesta puede servir no sólo a los desarrolladores de la Institución sino también a los investigadores del área de calidad del software o desarrolladores que desean conocer cómo están sus entregables de la fase de diseño de una aplicación web, pues las mediciones se han propuesto sobre atributos que fácilmente se encuentran en artefactos de cualquier proyecto de desarrollo para la web.

Los modelos y estándares que se han estudiado hasta ahora se organizan en factores o criterios, atributos, métricas e indicadores y explican cada uno de los elementos a tener en cuenta en la evaluación de calidad del producto, éstos modelos no se especifican para fases del producto como análisis, diseño, implementación o mantenimiento; por ello es deber del grupo o investigador de calidad realizar la respectiva aplicación del modelo según el caso y la necesidad a todo el producto en general. En este caso, se pretende establecer un modelo específico de medición en la fase de diseño.

Lo primero que se debe definir es sobre qué productos de diseño de aplicaciones para web se realizará el modelo de medición; como se menciona en el marco teórico de ésta investigación, Pressman [5] plantea cuatro modelos del diseño: el arquitectónico, el de datos o clases, el de interfaz y el de componentes; estos se tienen en cuenta para aplicaciones a nivel general pero a partir de la aparición de las aplicaciones web se agregan nuevos componentes por la particularidad de las mismas que hacen que los investigadores del tema de evaluación de calidad para la web creen nuevos modelos que tengan en cuenta éstos nuevos componentes. Es así como Pressman [5] en el mismo documento tiene en cuenta tres componentes más para el diseño de aplicaciones web que son el diseño estético, el diseño de contenidos y el diseño navegacional. Es sobre éstos productos se deberían plantear la medición de los proyectos catalogados como aplicaciones web. Como se mencionó, los modelos estudiados en el marco teórico mantienen la estructura a nivel general que se muestra en la Figura 1.

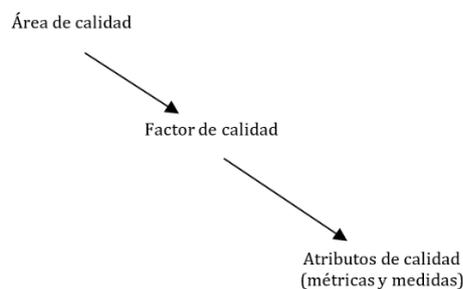


Figura 1. Estructura general de los modelos de calidad

La propuesta del modelo para la fase de diseño de aplicaciones web lleva una estructura parecida, pues no se pretende ni fueron los alcances de esta investigación realizar una propuesta de estructura de modelo diferente a las conocidas.

Una de las primeras decisiones que se plantea es que la medición se realice en etapas tempranas del diseño y no cuando éste ya esté terminado y en fase de implementación, pues se pretende que el usuario principal de éste modelo sea el *programador*, es él quien recibe los artefactos de diseño, debe implementarlo y el que más se beneficiaría de un diseño de calidad. Retomando el análisis donde se hace una comparación entre los diferentes modelos consultados de esta propuesta, se observaron las características que se presentan más en los diferentes modelos y por ello se van a revisar para mirar de qué manera pueden hacer parte del modelo propuesto. Aquí en este apartado las definiciones de éstas características se definirán desde el punto de vista del diseño que es nuestra fase de interés donde se realizará la medición.

La definición de *fiabilidad* desde el punto de vista del diseño es, la capacidad del diseño para mantener un nivel especificado de rendimiento cuando se utiliza en las condiciones especificadas. Si analizamos la palabra rendimiento las mediciones de esta característica deberían hacerse una vez la aplicación esté implementada y esta propuesta de modelo de medición espera hacer las mediciones sobre la calidad del diseño en etapas tempranas del desarrollo del software sin tener que esperar a la implementación por ello esta característica no sería de interés para el modelo a proponer.

La definición de *transportabilidad* desde el punto de vista del diseño sería, la capacidad del diseño de ser transferido de un entorno a otro; al pensar en la fase de diseño no se puede definir qué sería pasar el diseño de un entorno a otro en etapas tempranas sin pensar en implementación. Al igual que pasa con la anterior característica se realizarían las mediciones cuando esté el software en funcionamiento y no aplicaría a los objetivos del modelo a proponer.

La *facilidad de mantenimiento o mantenibilidad* desde el punto de vista del diseño, se define como la capacidad del diseño para ser modificado. Las modificaciones pueden incluir correcciones, mejoras o adaptación del software a cambios en el entorno, en los requisitos o en las especificaciones funcionales. Esta característica configura como una característica que se tendría como medición en el modelo a proponer.

Por último, *eficiencia, funcionalidad y usabilidad* se definen desde el punto de vista del diseño respectivamente como: la capacidad del diseño para proporcionar el rendimiento apropiado, relativo a la cantidad de recursos utilizados, bajo las especificaciones determinadas; la capacidad del diseño para proporcionar funciones que satisfagan las necesidades especificadas e implícitas cuando el diseño se utiliza en las condiciones especificadas; la capacidad del diseño de ser entendido, aprendido, utilizado y atractivo al desarrollador, cuando se utiliza en las condiciones especificadas. Al igual que el análisis que se realizó anteriormente con las características mencionadas, éstas se medirían en etapas posteriores a la implementación del software, de las tres últimas características la que se puede proponer para medición en el modelo para la fase de diseño de aplicaciones web es la de usabilidad.

Hecho este análisis se iniciará la propuesta por considerarse apropiado a las necesidades de medición de la misma el método Goal, Questions, Metric GQM, donde se parte de un *objetivo claro de qué y porqué se quiere medir* para luego plantear unas preguntas que serán relacionadas con unas métricas de esta manera se construirá el modelo para la fase de diseño de aplicaciones web. Una vez desarrollado se aplica el modelo en mínimos tres proyectos que tengan las características de aplicaciones web de los proyectos de grado del programa de ingeniería de sistemas y se realiza un análisis de estos resultados. Se partió de establecer los objetivos y las preguntas que harán parte de la medición. Se aplica una plantilla propuesta por Bassili y expuesta por Piattini [1] para definir los objetivos de medición como se muestra en la Tabla 1. Una vez aplicada esta plantilla se llega al siguiente objetivo (Tabla 2).

Tabla 1. Plantilla de definición de GQM [1]

Analizar	El objeto de estudio bajo medición
Con el propósito de	Entender, controlar o mejorar el objeto
Con respecto a	El enfoque de calidad del objeto en el que se centra la medición
Desde el punto de vista de	O perspectiva de las personas que miden el objeto
En el contexto de	El entorno en el que la medición tiene lugar

Tabla 2. Plantilla de Definición para modelo de indicadores para la fase de diseño de aplicaciones web

Analizar	Los entregables de la fase de diseño de aplicaciones web
Con el propósito de	Controlar los componentes de la fase de diseño de aplicaciones web
Con respecto a	La mantenibilidad y usabilidad de las aplicaciones web
Desde el punto de vista de	Los desarrolladores
En el contexto de	La mejora de los proyectos de grado del programa de ingeniería de sistemas de la Universidad

A partir de la definición del objetivo principal de medición se empiezan a plantear preguntas como cuáles son las métricas para medir el objeto asociado a un determinado objetivo. La primera pregunta a considerar para el objetivo antes planteado es: *¿Cuál es el diseño arquitectónico, navegacional, diseño de interfaz y de datos que ayuda a mejorar la comprensión para que el programador desarrolle fácilmente (entendibilidad) una aplicación web, no sacrifique la calidad en el diseño y mejore la mantenibilidad?* Bajo la consideración de la anterior pregunta la propuesta se realizará entonces alrededor de la *arquitectura, la complejidad del modelo E-R, el modelo navegacional y la interfaz de usuario.*

Con ello estaríamos centrándonos en el objetivo propuesto y es mejorar mantenibilidad y la entendibilidad para hacerle más sencillo el trabajo de implementación al desarrollador y a los mantenedores de la aplicación, pues cada uno de los productos propuestos son los que entrarán a hacer parte fundamental de la fase que sigue al diseño y ayudarán a simplificarla. Al docente evaluador del proyecto le permitirá en fases tempranas tener claridad sobre los artefactos y cómo deberían estar diseñados para cumplir con estas expectativas de calidad. El modelo de calidad estaría organizado como aparece en la Figura 2.

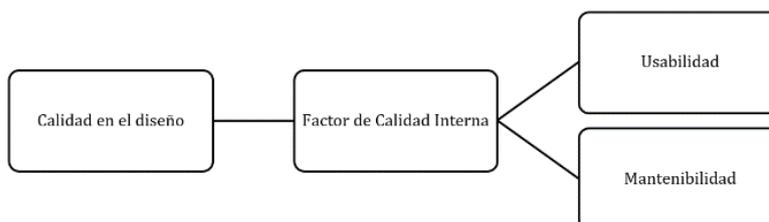


Figura 2. Modelo de Calidad para aplicaciones web en fase de diseño. Área-Factor-Características

3.1 Artefactos a medir en la fase de diseño de aplicaciones web

En ésta investigación se revisaron las metodologías existentes para el diseño de aplicaciones web y llamó la atención una de ellas por estar enfocada al metalenguaje UML, esta metodología denominada UWE [6] que plantea cuatro fases

una que tiene que ver con el diseño conceptual enfocada ésta al diagrama de clases de UML, otra con el diseño navegacional enfocada ésta al modelo navegacional artefacto al que muchos investigadores del tema le dan gran importancia en la aceptación de una aplicación web, el diseño de la presentación o diseño de la interfaz vista desde el punto de vista de diagrama UML y la implementación de la aplicación como tal.

También se presentó una nueva filosofía de desarrollo denominada MDD que se conoce como desarrollo producido por modelos. Se propone por motivos de mejorar la entendibilidad y usabilidad de los diseños para los estudiantes desarrolladores que se realicen con esta orientación los diseños de los proyectos de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica, además de algunas ventajas que ya se expusieron en el mismo apartado. Se solicitará al estudiante trabajar bajo tres modelos que representarían los artefactos de la fase de diseño de las aplicaciones web de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica: un modelo estructural, un modelo funcional y el modelo de interfaz de usuario. Estos a su vez se convertirían en la arquitectura de las aplicaciones entregadas por los desarrolladores. En la Tabla 3 se muestran los tres modelos del diseño.

Tabla 2. Artefactos de diseño para una aplicación web para la Universidad Popular del Cesar

Artefactos de diseño para las aplicaciones web de la Universidad Popular del Cesar, Seccional Aguachica	Modelo estructural
	Modelo funcional
	Modelo de interfaz de usuario

3.2 Modelo estructural

Con el modelo estructural se hace referencia al modelo de datos de la aplicación web a desarrollar, en él se deben representar las tablas principales de los datos del que trata el dominio del problema, éstas tablas se representan gráficamente a través de un cuadro que deberán contener en la parte superior los nombres que sean significativos a los datos que representan, y que posteriormente muchos de los programadores usan cuando desarrollan su labor; también debe aparecer en el modelo gráfico los atributos de cada entidad y por último las relaciones que pueda existir entre las tablas. Teniendo en cuenta que las relaciones que se representen son 1- 1, 1 - muchos o viceversa, y muchos a muchos. Las claves principales y las foráneas se deben explicitar también en éstos recuadros. Se completa el modelo de igual forma con una plantilla que por razones de practicidad y como un aporte a la documentación del diseño se deberá diligenciar, esto permitiría al evaluador de calidad tomar datos para las mediciones, sin tener que acudir al documento final del proyecto que contiene otro tipo de información que no es relevante para la medición. Igual esta información se debe evaluar en fases tempranas del proyecto de grado, por ello se recomienda hacerlo en el formato II de la asignatura proyecto de grado I.

3.3 Modelo funcional

Cachero et al. [7] manifiestan que el principal artefacto de la Ingeniería Web relacionado con la navegabilidad es el *modelo navegacional*. Y lo definen como los caminos de navegación que el usuario puede seguir a través del espacio de información con el fin de conseguir sus objetivos. Se encuentra en la bibliografía varias formas de estructurar el *modelo navegacional*, sin embargo, en esta propuesta se presenta un esquema de modelo que ayuda a la presentación de la estructura navegacional y facilita también a nivel funcional el entendimiento de éste tipo de artefactos tan necesarios en el ámbito del desarrollo web de manera muy sencilla.

Teniendo en cuenta que de la fase de análisis se generan los requisitos funcionales del programa que propondrán las funcionalidades del mismo, éstas se tomarán y serán organizadas por módulos; cada funcionalidad tendrá un conjunto de páginas cuya secuencia representará la navegabilidad por funcionalidad. Este será el modelo propuesto para los diseños de los proyectos de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica. Se documentará en una plantilla de funcionalidad propuesta, los roles y los permisos de acceso por cada rol, en este formato se organizarán los *storyboard* de la aplicación, donde se listarán las diferentes funcionalidades con las respectivas tablas, gráficos de secuencia de las páginas con una descripción de los enlaces que existen a las otras páginas que ayudará a entender la navegabilidad. Los gráficos para representar las secuencias de cada enlace entre páginas se representarán como se ve la Figura 3.

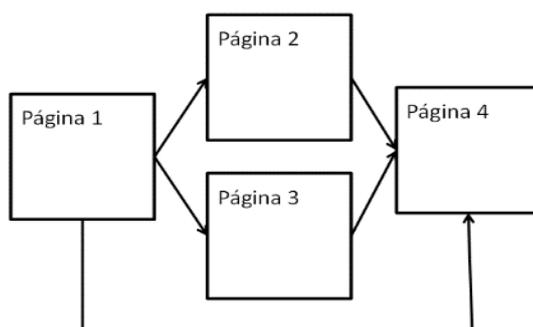


Figura 2. Ejemplo de cómo se representa una funcionalidad de forma gráfica. Navegabilidad

Y los módulos con sus diferentes funcionalidades quedarán como aparece la Figura 4.

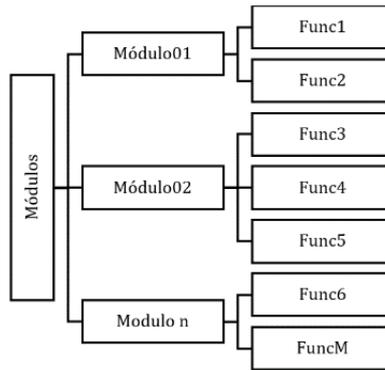


Figura 3. Gráfico del diseño funcional completo para una aplicación web

3.4 Modelo de interfaz de usuario

Las interfaces de usuario de las aplicaciones web de la Universidad serán representadas gráficamente y de manera muy abstracta con un modelo de diseño de páginas que a nivel general puedan mantener la siguiente apariencia: un recuadro donde se dibuje de forma sencilla los contenidos de las páginas como: encabezados, barras de navegación vertical u horizontal, contenidos a mostrar, entre otros. Se recomienda representar las regiones, preferiblemente con los colores que se pretenden para la implementación. Se propone el uso de plantillas que especifiquen los datos mencionados en los trabajos de grado de Ingeniería de Sistemas, pues se consideran suficiente para desarrollar toda la aplicación. Una interfaz gráfica en esta fase del diseño se representaría de la manera como se ve en la Figura 5.

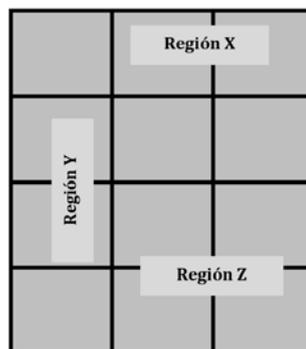


Figura 4. Ejemplo de diseño de interfaz gráfica abstracta para el modelo de aplicaciones web de la Universidad

Para éste caso también se propone una plantilla como en los artefactos anteriores, en ella se tendrán en cuenta datos como diseño de la plantilla, cantidad de regiones en la plantilla, conteo de color, conteo de fuente, y uso de guías de estilo que mejoran la apariencia de las páginas y la facilidad en detalles sencillos del mantenimiento de la interfaz gráfica. El ejemplo de las asignaturas y los estudiantes, si éste fuera el caso de un módulo de matrícula académica, podría quedar en cuanto al diseño gráfico abstracto, como se ve en la Figura 6.

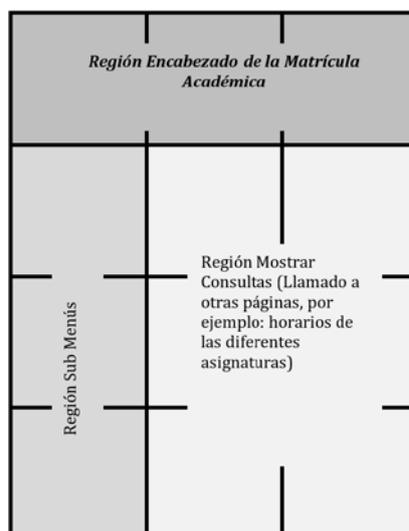


Figura 5. Interfaz gráfica abstracta. Caso ejemplo

3.5 Propuesta de atributos, métricas e indicadores y medición del modelo

Partiendo del objetivo de la medición acordado con la tabla 2, es claro que se tienen dos características que se desean medir en los artefactos antes mencionados: mantenibilidad y entendibilidad desde el punto de vista del desarrollador. La mantenibilidad se ve como una característica en varios de los modelos estudiados mientras el concepto de entendible es una sub-característica que se encuentra en la característica de usabilidad en el modelo de calidad para el producto denominado WQM, que es un modelo para las aplicaciones web. Por ello las dos características que se definieron como medibles fueron las de mantenibilidad y usabilidad. En la Tabla 4 se definen según la norma ISO 9126 las siguientes sub-características o atributos.

Tabla 3. Características de usabilidad y mantenibilidad de ISO 9126 con sus atributos

Usabilidad	<i>Capacidad de ser entendido</i>
	<i>Capacidad de ser aprendido</i>
	Capacidad de ser operado
	Capacidad de atracción
	Cumplimiento de usabilidad
Capacidad de mantenimiento	<i>Capacidad de ser analizado</i>
	<i>Capacidad de ser cambiado</i>
	Capacidad de ser probado
	Cumplimiento de la mantenibilidad

Los atributos denominados Capacidad de ser operado, Capacidad de atracción y Cumplimiento de usabilidad, son sensibles de medir cuando la aplicación está en funcionamiento pues la característica de usabilidad se mide cuando la aplicación se ha implementado, sin embargo, existen investigaciones que demuestran que es bueno medirla en etapas tempranas del desarrollo, entre estas investigaciones podemos mencionar la realizada por [8]. El modelo WQM está basado en la 9126 por tal motivo se acogen muchos de sus atributos. La propuesta de atributos serían los de las Tablas 5 y 6.

Tabla 4. Atributos para la característica de Usabilidad para el modelo de indicadores de las Aplicaciones Web en fase diseño

Usabilidad	Entendibilidad vista desde la métrica de legibilidad
	Comprensibilidad del diseño
	Facilidad de aprendizaje del diseño

Tabla 5. Atributos para la característica de Usabilidad para el modelo de indicadores de las Aplicaciones Web en fase diseño

Mantenibilidad	Capacidad de ser analizado el modelo estructural
	Capacidad de ser cambiado el modelo estructural

Se dejaron sin medir los atributos capacidad de ser probado y cumplimiento de la mantenibilidad, pues se considera que no aplican para medir en la fase de diseño pues se medirían mejor cuando ya esté implementada la aplicación web. Seleccionados los atributos que se consideran medirán las características se procede a seleccionar las métricas, los indicadores y la estructura de medición.

3.5.1 Métricas del diseño estructural

Una vez aclarado lo que se requiere del modelo estructural, se verifica cómo se medirán las características mantenibilidad y usabilidad a través de los atributos seleccionados. Para éste artefacto se conocen las métricas cuya autora [9] proponen medir la complejidad estructural de los modelos entidad relación con un conjunto de métricas que más adelante se detallan [10].

Se afirma que entre más complejidad tenga un modelo entidad relación va a ser más complicado éste de usar y de mantener. Además de la propuesta de Piattini et al. [9] se encuentran algunas métricas del conjunto propuesto para medir características como la compleción, integridad, flexibilidad entre otras que se denominan métricas de Moody, sin embargo, éstos no se tienen en cuenta porque miden características diferentes a los atributos seleccionados para la medición que se ha propuesto. Se tuvieron en cuenta las métricas de Piattini et al. y se aplicaron al modelo relacional propuesto, pues éstos modelos tienen muchas similitudes. De igual forma [11] mencionado por [10] hacen una propuesta de métricas para evaluar la mantenibilidad de los modelos relacionales cuyas métricas son similares a las ya mencionadas [9]. Las métricas seleccionadas serán las siguientes:

- Número total de tablas dentro de un modelo relacional
- Número total de atributos dentro de un modelo relacional
- Número total de Relaciones en un modelo relacional

Las métricas de relaciones, son validadas como métricas de complejidad y del tipo de escala ratio. Se podrían mencionar más métricas, pero éstas son las que se consideran relevantes para la medición que se pretende realizar. Los investigadores [12] afirmaron que la entendibilidad de los modelos ER se veían afectados por la complejidad

estructural que introducen en los modelos ER los atributos y las interrelaciones. Es decir, entre más atributos y relaciones (1:1 y 1:N) tenga el modelo ER más difícil será entenderlo [10]. Se aplicarán entonces estos razonamientos al modelo relacional cuando se realice la medición. Las métricas para medir los atributos serán los que se ven en la Tabla 7.

Tabla 6. Atributos y métricas para la medición de mantenibilidad del modelo estructural

Atributo	Métricas
Capacidad de ser analizado	Número de relaciones
Capacidad de ser cambiado	Número de tablas

La propuesta de métricas para hacer la medición de la usabilidad del modelo relacional es tomada de Berthoa y Vaecillo en su artículo medidas de usabilidad de componentes software, publicación realizada en la revista IEEE para Latinoamérica en el 2006 [13] y será retomada para los otros dos artefactos en su característica de usabilidad. Los atributos y las métricas propuestos son los que aparecen en la Tabla 8.

Tabla 7. Atributos y métricas de la medición de usabilidad del modelo estructural

Atributo	Métricas
Legibilidad	Porcentaje de tablas entre 10 y 20 caracteres
Comprensibilidad del diagrama de clases	Promedio de atributos por tabla
Facilidad de aprendizaje del modelo de clases	Porcentaje de tablas adecuadamente descritas

Bertoa [13] en su propuesta de medición de artefactos para diseño en las características de calidad toma la legibilidad como los nombres largos que se le asignen a cualquiera de los objetos que más adelante usarán los desarrolladores y propone un máximo de caracteres para los nombres, para medir la comprensibilidad y la facilidad de aprendizaje se guían por la medición de los tiempos que invierte un desarrollador en comprender y en usar con facilidad y sin equivocaciones el modelo. Aquí se proponen éstas las medidas *promedio de atributos por tabla* y *porcentaje de tablas adecuadamente descritas* por considerarse adecuadas para medir la comprensibilidad y la facilidad de aprendizaje, pues se pretende que con sólo mirar los artefactos el evaluador pueda tener un concepto del modelo sin necesidad de hacer encuestas ni entrevistas a los desarrolladores.

3.5.2 Métricas del diseño funcional

Una vez clarificado el artefacto denominado modelo funcional se analizará cómo medir la mantenibilidad y usabilidad del mismo. Cachero y otros [7] proponen una métrica que denominan número de destinos navegacionales (NDN) a partir de la definición y validación de métricas para modelos de navegación propuestos por Abrahão y otros. El fin es medir la complejidad del modelo navegacional para establecer la calidad de la navegación en lo referente a mantenibilidad. Esta métrica tiene una unidad de medida de tipo escala en la categoría ratio.

Sin embargo, la pregunta es qué se puede considerar de calidad o no con esta medida; para ello se acogen a la regla de Miller que manifiesta, según estudios realizados, que para que un modelo no sea ni demasiado trivial ni demasiado complejo el NDN debe estar en el rango entre cinco y nueve (incluyendo éstos valores). Esta sería la medida para la complejidad del modelo navegacional que tendría relación con la mantenibilidad. Se tomará de Abr [14] la medida denominada: distancia más larga de un contexto de navegación de la raíz a un contexto hoja, esta propone calcular las distancias más largas que hay desde la raíz del modelo navegacional hasta llegar a las hojas que se encuentran en los contextos del modelo navegacional. Los contextos son las diferentes divisiones que posee un modelo navegacional y hacia donde se bifurca la atención de un usuario de una aplicación web. En la Tabla 9 se mencionan los atributos y métricas seleccionadas para el modelo funcional.

Tabla 8. Atributos y métricas para la medición del modelo funcional

Atributo	Métricas
Capacidad de ser analizado	Promedio de distancia más larga de un contexto de navegación de la raíz a un contexto hoja
Capacidad de ser cambiado	Número de nodos

Para la usabilidad se tomarán algunas medidas presentes en la investigación presentada por Berthoa [13], sin embargo, para la comprensibilidad se tomaron las medidas relativas a los *storyboard* documentados y para la facilidad de aprendizaje se tomará la métrica del número de contextos de navegación. Esta última medida se toma de Cachero [7]. Las métricas con los atributos de la usabilidad del modelo funcional quedarían, así como aparecen en la Tabla 10.

Tabla 9. Atributos y métricas para la medición de la Usabilidad del modelo funcional

Atributo	Métricas
Legibilidad	Porcentaje de nodos con nombres entre 10 y 20 caracteres
Comprensibilidad del diagrama de clases	Porcentaje de <i>storyboards</i> documentados
Facilidad de aprendizaje del modelo de clases	Número de contextos de navegación

3.5.3 Métricas del diseño de interfaz de usuario

Las métricas para la mantenibilidad de la interfaz de usuario se definirán a través de plantillas, regiones, conteo de color, conteo de fuentes y guías de estilo. Estas métricas son tomadas desde el planteamiento de Pressman [5], y algunas recomendaciones encontradas de diseñadores web. Las métricas que se consideran en este caso para medir la complejidad del diseño de interfaz son las relativas a la posibilidad de cambios en los colores, tipos de fuentes, posibilidades de validación de datos en el cliente y campos que existan en la interfaz que permitan los famosos atajos a los que los usuarios finales están acostumbrados por el sistema operativo Windows, esto afectaría la capacidad de análisis de una interfaz gráfica, si no se tiene bien especificados estos datos en la plantilla ésta es muy compleja de analizar. Por otro lado, la posibilidad que se le permita al usuario final cambiar temas y guías de estilo hace más fácil la posibilidad de cambiar el diseño de la interfaz sin que tenga que hacerse un cambio en la aplicación y esto ayudaría a la capacidad de ser cambiada la interfaz gráfica y por ende a la mantenibilidad. Las métricas que se obtendrían del formato de plantilla del modelo de interfaz gráfica que se planteó quedarían como se ve en la Tabla 11.

Tabla 10. Métricas, indicadores para medir la mantenibilidad del modelo Interfaz gráfica

Atributo	Métricas
Capacidad de ser analizado	Porcentaje de plantillas que especifican: conteo de color, conteo de fuente, ayuda en línea, validación de datos en el cliente, campos con atajos
Capacidad de ser cambiado	Porcentaje de platillas que permiten la definición de temas por parte de cada usuario y la plantilla de estilo

Para la usabilidad del modelo de interfaz gráfica se tomaron algunas métricas encontradas en Pressman [5], quien plantea la complejidad de la plantilla como el número de regiones que existan en la misma, aunque no especifica cómo sería su medición e interpretación se asume que una cantidad excesiva de regiones en una plantilla haría complejo la legibilidad de la misma y por ende afecta su usabilidad. La comprensibilidad del modelo se pretende medir por lo bien documentada que se encuentre cada plantilla, así mismo la capacidad de aprendizaje se relacionó con la cantidad de plantillas que proponga el modelo, a mayor cantidad de éstas se disminuye para el desarrollador su capacidad de aprender el diseño de la interfaz gráfica, en la Tabla 12 se mencionan los atributos con sus respectivas métricas.

Tabla 11. Atributos y métricas para la medición de la Usabilidad del modelo de interfaz gráfica

Atributo	Métricas
Legibilidad	Promedio de número de regiones por plantillas
Comprensibilidad del diagrama de clases	Porcentaje de plantillas bien documentadas
Facilidad de aprendizaje del modelo de clases	Número de plantillas

3.6 Indicadores del modelo propuesto

Para cada métrica de las documentadas en los apartados anteriores hay diferente tipo de indicadores que ayudan al cálculo de las mismas y que una vez aplicada la fórmula de cálculo se interpretan éstos resultados para lograr conocer qué tan aceptable es el diseño entregado por el estudiante para una aplicación web en la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica.

La diversidad de propuestas en lo relativo a calcular los diferente tipos de métricas que en su conjunto medían atributos distintos y cuyos valores en cuanto a qué se consideraba un buen valor para considerar el modelo como excelente, aceptable o deficiente llevan a realizar la propuesta de un indicador que pudiese medir cada una de las métricas seleccionadas para el modelo de indicadores de aplicaciones web en la fase de diseño sin importar si para un atributo los rangos de valores aceptables fuesen bajos o altos. El indicador que se propone, cuando en los valores de interpretación de la métrica el valor más bajo es malo y el más alto es bueno, sería un indicador que se denominará de tipo I y se calculará de la siguiente forma como aparece en la ecuación (1).

$$y = \frac{Min_{aceptable} - X_{valor-real}}{Min_{aceptable} - Max_{aceptable}} \quad (1)$$

Siendo $Min_{aceptable}$ el valor mínimo aceptable que el evaluador experto considera es el mínimo para ése modelo, $Max_{aceptable}$ el valor máximo aceptable que el evaluador experto considera es el máximo para ése modelo y $X_{valor-real}$ el valor real que se observa en el modelo. Cuando en los valores de interpretación de la métrica el valor más bajo es considerado bueno y el más alto malo, se utilizará un indicador que se denominará de tipo II y se calculará de la siguiente forma como aparece en la ecuación (2).

$$y = \frac{Max_{aceptable} - X_{valor-real}}{Max_{aceptable} - Min_{aceptable}} \quad (2)$$

La interpretación de los términos que hacen parte de la fórmula son los mismos que se explicaron en la ecuación (1). Esta fórmula permite normalizar todas las mediciones para realizar los cálculos independientes del tipo de métrica y

de sus rangos de aceptación. Una vez normalizados los datos se pasa a la interpretación de los resultados, para ello se plantean unos rangos favorables en cuanto a la exigencia en el ámbito de los estudiantes de pregrado, de igual forma, si se desea ser más exigente con los modelos pues éstos rangos los puede cambiar el evaluador del proyecto. Los rangos de aceptabilidad serían los que se mencionan en la Tabla 13.

Tabla 12. Rangos de aceptabilidad del modelo de indicadores para aplicaciones web en la fase de diseño

Rango de valores	Concepto
0 - 0,3	Malo
0,4 - 0,7	Aceptable
0,8 - 1	Excelente

Una vez calculados los valores de las métricas y los atributos se busca conocer el valor de aceptabilidad de la característica, para ello se le asignarán pesos a los atributos que indicarán qué tan importante es para el evaluador ése atributo con respecto a los otros cuidando que la suma de los pesos de los atributos para una característica no sea mayor que uno. Esta es la primera agregación que se hace de los atributos de cada característica; luego se deben agregar los valores de las características para sacar la conclusión completa del modelo en cuanto a la calidad interna del producto, también se proponen pesos para que el evaluador le dé la importancia a cada característica dentro del factor y así se pueda conocer el resultado de aceptación de todo el modelo evaluado. En la Tabla 14 se presenta un ejemplo.

Tabla 13. Agregación de pesos a los atributos y características para el cálculo final del factor de calidad interna del producto

Característica	Peso	Atributo	Peso	Métrica
Usabilidad	0,6	Legibilidad	0,4	% 10-20
		Comprensibilidad	0,3	Prom. atribXtab
		Fac.Aprendizaje	0,3	% tablas adec. Descritas
		Total suma atributos	1	
Mantenibilidad	0,4	Capac. De ser analizado	0,6	Nro. Relaciones
		Capac. De ser cambiado	0,4	Nro. Tablas
		Total suma atributos	1	
1		Suma de pesos de características para el modelo estructural		

Para la medición de todo el modelo se diseña una herramienta en Excel que permite hacer los cálculos alimentando los valores máximos, mínimos, el valor real y los pesos de las características y los atributos. Finalmente, el modelo queda como se ve en la Figura 7.

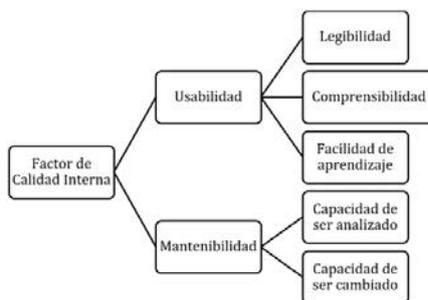


Figura 6. Modelo de calidad interna del producto para aplicaciones web en fase diseño. Características y atributos

Estos indicadores también han sido de manera empírica probados en un modelo de medición aplicado a los desarrollos clasificados como aplicaciones de escritorio. Esto se pudo evidenciar en Beleño y otros [15].

4. CONCLUSIONES

A partir de la revisión de algunos modelos de calidad y pautas de evaluación de software se observaron los diferentes factores, características y atributos que hacen parte de cada uno. Esto permitió conocer el estado de arte de los modelos de calidad y pretender proyectar hacia dónde está encaminándose la evaluación de software. El trayecto que queda por recorrer es largo y aún no se puede decir que ya hay una conceptualización establecida en el campo de la medición por ello se encuentran muchas propuestas de investigación sólo estableciendo la ontología de términos en la calidad del software y en la medición.

En el caso de los diseños y específicamente de las aplicaciones web, aunque se pueden parecer mucho los entregables a los de las aplicaciones convencionales, es claro que las necesidades de calidad en cada una son diferentes debido a la diversidad de usuarios y a las características muy específicas de las aplicaciones web.

No se encontró un modelo específico para la fase de diseño ni de aplicaciones convencionales ni para la web; con la revisión del estado del arte se estableció según las necesidades de medición que el GQM era una metodología acertada

para iniciar la propuesta del modelo de indicadores y una vez analizadas las principales características de cada modelo se seleccionaron dos por ser las que se consideraban más acertadas para medir un diseño en etapas tempranas del desarrollo. Una vez establecidas las necesidades y los objetivos de medición se plantean los artefactos que se deberían medir o solicitar a un proyecto de grado de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica y se estableció que fuese independiente de la plataforma, para ello se proponen tres modelos con los que se considera se puede representar el diseño de las aplicaciones web de la Universidad: el estructural, el funcional y el de interfaz gráfica. Estos diseños basados en modelos permiten la sencillez que tanto puede ayudar a que los estudiantes propongan los artefactos de esa fase que tiene tanto nivel de abstracción como es la fase de diseño. Para ayudar a la evaluación de éstos modelos se proponen tres plantillas una para cada uno, esto también permitiría que la evaluación realizada en la plantilla de Excel se pueda alimentar con mayor facilidad.

El diseño funcional propuesto es una combinación de las funcionalidades de la aplicación con lo que se estableció como diseño navegacional.

Se establecen unos atributos que permitiesen medir las características teniendo en cuenta que éstas se pudiesen observar en etapas tempranas del desarrollo dándole al modelo de indicadores un enfoque predictivo pues se cuidó que la evaluación no se hiciera cuando el producto está terminado.

Para la medición se hace una propuesta novedosa y es poder medir aplicando la normalización con una fórmula que sirve para todas las métricas; lo recomendable para que la evaluación sea exitosa es que el evaluador sea conocedor del diseño de aplicaciones web pues la fórmula de normalización depende en gran medida de la experticia del mismo.

Por último, se aplica el modelo a tres proyectos de la Universidad Popular del Cesar permitiendo hacer una validación del modelo y así tener un concepto con medidas de cómo se encuentran los diseños de los proyectos de la Universidad que están catalogados como aplicaciones web.

Estos resultados indican que hay mucho trabajo por hacer por parte de directores de grado, evaluadores y jefe del programa pues los resultados en general fueron deficientes, esto indica que los proyectos evaluados tienen diseños que en su mayoría no se podrían usar y también muy difíciles de mantener no sólo porque no cumplen con estándares de calidad sino porque en muchos casos no son explícitos en cómo eran éstos diseños.

Esta propuesta puede mejorar en gran manera los diseños de las aplicaciones web desarrolladas como proyectos de grado de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica no sólo por la evaluación sino también por la propuesta de los modelos con sus respectivas plantillas.

Aunque no se aplicó un modelo de evaluación específico si se siguieron las pautas del estándar 14598 que especifica cómo realizar la medición del producto enfocado a la norma 9126 y que luego fue fusionado con la misma convirtiéndose en la norma ISO/IEC 25000.

REFERENCIAS

- [1] Piattini, M., García, F. y Caballero, I. (2009). Calidad de Sistemas Informáticos. Alfaomega.
- [2] Baldeón, E. (2015). Método para la evaluación de calidad de software basado en ISO/IEC 25000. Recuperado: https://www.academia.edu/33838680/FACULTAD_DE_INGENIER%C3%8DA_Y_ARQUITECTURA_M%C3%89TODO_PARA_LA_EVALUACI%C3%93N_DE_CALIDAD_DE_SOFTWARE_BASADO_EN_ISO_IEC_25000_ED%C3%9AJAMES_BALDE%C3%93N_VILLANES_TESIS_PARA_OPTAR_EL_GRADO_ACAD%C3%89MICO_DE_MAESTRO_EN_COMPUTACI%C3%93N.
- [3] Reifer, D. (2000). Desarrollo web: estimación de software de lanzamiento rápido. Software IEEE, 17(6), 57-64.
- [4] Hernández, S. (2003). Metodología de la Investigación. McGraw Hill.
- [5] Pressman, R. (2010). Ingeniería del Software. Un enfoque práctico. McGraw Hill.
- [6] Narváez, A. et al. (2011). Experiencia de desarrollo de una aplicación web utilizando la metodología UWE y el lenguaje QVT en la transformación de modelos. Recuperado: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4596/2/T-ESPE-032708-A.pdf>.
- [7] Cachero, C. et al. (2006). Transformación de modelos navegacionales dirigida por criterios de calidad. Recuperado: <http://ceur-ws.org/Vol-227/paper10.pdf>.
- [8] Fernandez, A., Insfran, E. y Abrahao, S. (2010). Evaluación de usabilidad para aplicaciones web. Recuperado: <http://users.dsic.upv.es/~afernandez/files/publications/pdf/Fernandez-et-al-CLEI10.pdf>.
- [9] Piattini, M., Genero, M. y Jimenez, L. (2001). A metric-based approach for predicting conceptual data models maintainability. Recuperado: https://www.researchgate.net/profile/Mario_Piattini/publication/220344924_A_Metric-Based_Approach_for_Predicting_Conceptual_Data_Models_Maintainability/links/00463525cd5c5ba185000000.pdf.
- [10] Piattini, M. et al. (2008). Medición y estimación del software. Alfaomega.
- [11] Calero, C., Piattini, M. y Genero, M. (2001). Empirical Validation of referential integrity metrics. Recuperado: https://www.researchgate.net/profile/Coral_Calero/publication/222703040_Empirical_validation_of_referential_integrity_metrics/links/00b7d523ac348b4586000000.pdf.
- [12] Genero, M., Piattini, M. y Poels, G. (2007). Defining and validating metrics for assessing the understandability of entity-relationship diagrams, Recuperado: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169023X07001796>.

- [13] Bertoa, M., Vallecillo, A. y Troya, J. (2005). Measuring the usability of software components. Recuperado: [vhttp://gmm.fsksm.utm.my/~mrazak/articles/Elsevier--Bertoa_2006--Measuring_the_Usability_of_Software_Components.pdf](http://gmm.fsksm.utm.my/~mrazak/articles/Elsevier--Bertoa_2006--Measuring_the_Usability_of_Software_Components.pdf).
- [14] Abrahao, S. et al. (2003). Defining and Validating Metrics for Navigational Models. Recuperado: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1232468&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1232468.
- [15] Beleño, K., Rincón, M. y Palencia R. (2018). Desarrollo e Innovación en Ingeniería. Propuesta de indicadores para medir el estado de calidad interna de las aplicaciones de escritorio, desarrolladas como proyecto de grado en la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica aplicando la norma ISO 25000. En Serna M., E. (Ed.). Desarrollo e innovación en Ingeniería (pp. 112-119). Instituto Antioqueño de Investigación.

Modelos de aprendizaje de máquina para el control predictivo de la calidad de cemento

William Diaz Córdoba
Laura Lotero Vélez
Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

La resistencia a la compresión es uno de los principales parámetros de calidad del cemento y su resistencia a la edad de curado de 28 días, es fundamental para indicar que el cemento cumple finalmente con este parámetro de desempeño. Sin embargo, por la alta demanda del producto, no siempre se hace posible esperar a cumplir con este tiempo de curado para verificar la calidad, antes de ser enviado. Esto conlleva a un enorme riesgo de incumplimiento de la ficha técnica y una alta variabilidad del proceso debido a que se toman medidas de control correctivo pasados 28 días. Debido a esta problemática, la industria prefiere sobre-especificar su producto, lo que se traduce en ineficiencia de optimización en la formulación. El objetivo de este estudio es utilizar las variables químicas, físicas de control de proceso y mineralógicas generados por la industria cementera para el control de la producción y aplicar metodologías de aprendizaje de máquina con el fin de plantear un modelo predictivo de clasificación, que permita determinar si un cemento cumple con las especificaciones técnicas desde su producción, sin necesidad de esperar 28 días para conocer su desempeño, con el cual se tomen decisiones de manera rápida y confiable a favor de la optimización de la producción, de los procesos y del mejoramiento de la calidad del producto. En este sentido se evaluaron diferentes modelos predictivos de clasificación como la regresión logística, el árbol de clasificación, bosque aleatorio (*random forest*), k vecinos más cercanos (KNN), red neuronal y máquina de soporte vectorial. Los modelos de *random forest* y KNN fueron los de mejor precisión con 0.94 cada uno y con un área bajo la curva (ROC) de 0.98 para la red neuronal, y 0.94 para el modelo de KNN. Sin embargo, todos los modelos dieron áreas bajo la curva y precisión por encima de 0.85, indicando buen ajuste para la predicción de la calidad del cemento.

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación de cemento está dividida en dos grandes procesos consecutivos. El primero es la fabricación del clinker, que, según [1] y [2], es una roca producida por la combinación a 1450°C de materiales ricos en SiO₂, CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃, que al calcinarlos generan minerales hidráulicos que son los responsables de las propiedades de fraguado y resistencia del cemento. El segundo proceso es la molienda del clinker junto con yeso que actúa como controlador de la hidratación, para fabricar cemento. El proceso de fabricación de Clinker es controlado químicamente por medio de ecuaciones teóricas llamadas módulos y fórmulas de Bogue, donde en [3-5], se indica que solo se tiene en cuenta la química de los materiales para indicar la calidad del cemento, sin tener en cuenta variables de proceso o mineralógicas que son de igual o mayor importancia. Así mismo, indican que, en el cemento, el control de calidad se lleva a cabo mediante ensayos de resistencia a la compresión donde la conformidad del material se da después de 28 días de haber hecho el ensayo.

Sin embargo, debido a la alta demanda, el producto se despacha inmediatamente después de producido, lo que conlleva un enorme riesgo de incumplimiento hacia los clientes, además por la alta variabilidad de los procesos. Esto se convierte en foco de ineficiencia por la falta de optimización de la formulación del cemento y del proceso. Teniendo en cuenta esto, la industria ha tomado como prioridad encontrar nuevas fuentes de materiales para reducir el costo de producción, dejando de lado, la optimización, el control de los procesos y de calidad, llevándolos bajo un control correctivo, o post producción. En consecuencia, es imperativo determinar una metodología de control de proceso, diferente a la actual, que pueda sostenerse en el tiempo y que le aporte a la industria confiabilidad y estabilidad en su proceso.

De acuerdo a lo anterior, y aprovechando la disponibilidad de los datos producidos en tiempo real durante el proceso con la que cuenta la industria cementera, se pretende, generar el conocimiento necesario que lleve a demostrar la pertinencia en la utilización de modelos matemáticos predictivos de *machine learning*, que permitan apoyar la toma de decisiones, sobre el desempeño esperado del material producido, sin necesidad de esperar los resultados de las pruebas a posteriori y con esto brindar confianza al control de calidad y optimizar la formulación del cemento, que se traduce en reducir costos o aumentar ganancias y aumentar la competitividad de la compañía.

2. MÉTODO

Esta investigación pretende abarcar el estudio de diferentes modelos de aprendizaje de máquina e inteligencia artificial aplicados en la industria cementera y así determinar su pertinencia como herramienta soporte para el control predictivo del proceso y de la calidad en pro del aumento de la confiabilidad, reducción de la variabilidad, que redunde en competitividad empresarial.

En este sentido, se plantearon 6 modelos de aprendizaje de máquina para clasificación supervisados. Estos modelos son: regresión logística, árbol de decisión, *random forest*, árbol de decisión, K vecinos más cercanos (KNN), máquina de soporte Vectorial (SVM) y redes neuronales. Finalmente, se comparan los resultados y se busca el mejor modelo predictivo para el conjunto de datos de la industria cementera que permita clasificar el cemento, con base en ciertas variables de producción, en cemento conforme o no conforme con base en la resistencia a compresión después de 28

días, sin necesidad de esperar dicho tiempo. Para la creación de estos modelos, se utilizaron las bases de datos de calidad de la industria cementera, en donde se encuentran los parámetros de la Tabla 1, donde se aprecian todas las variables que se utilizaron en el planteamiento de los modelos de clasificación, la variable a predecir es el cumplimiento o no con la norma de resistencia a compresión a 28 días, se tienen en las variables, parámetros químicos, mineralógicos (que dan información del proceso de clinkerización), de finura (que dan información del proceso de molienda) y otras variables de desempeño que son los valores de resistencias a 1, 3, 7 y 28 días.

Tabla 1. Explicación de cada variable de la base de datos.

Variable	Unidad	Descripción de la variable
Blaine	(cm ² /g)	Finura del material
Retenido 325	(%)	Granulometría del material
SiO ₂	(%)	Composición Química
Al ₂ O ₃	(%)	Composición Química
Fe ₂ O ₃	(%)	Composición Química
CaO	(%)	Composición Química
MgO	(%)	Composición Química
SO ₃	(%)	Composición Química
K ₂ O	(%)	Composición Química
Na ₂ O	(%)	Composición Química
P.I.	(%)	Agua y Material volátil a 950°C
Cal libre	(%)	Composición Química
EA	(%)	% de material alcalino
C3S	(%)	Mineralogía del cemento
C2S	(%)	Mineralogía del cemento
C3A	(%)	Mineralogía del cemento
C4AF	(%)	Mineralogía del cemento
CN	(%)	Cantidad de agua necesaria para una consistencia normal
FI	tiempo (min)	Tiempo de fraguado Inicial
FF	tiempo (min)	Tiempo de fraguado Final
Yeso	%	Controla el tiempo de fraguado- Materia prima
Caliza	%	Filler o relleno
Clinker	%	Proporciona las fases hidráulicas
Consumo de Agua	Adimensional	Consumo de agua para en análisis de resistencia a la compresión
R1 día	Mpa (Fuerza)	Resistencia a la compresión a 1 día
R3 días	Mpa (Fuerza)	Resistencia a la compresión a 3 días
R7 días	Mpa (Fuerza)	Resistencia a la compresión a 7 días
R28 días	Mpa (Fuerza)	Resistencia a la compresión a 28 días

2.1 Análisis de datos

En el desarrollo de este trabajo se utilizó una base de datos de 3910 instancias con 29 variables. A éstas se les hizo un procesamiento de datos como lo indican en [6-9]; se depuraron para eliminar datos anómalos, imputar valores perdidos, estimar parámetros de colinealidad entre variables y reducir la dimensionalidad, entre otros. Todo con el fin de tratar los datos de una forma ordenada, y metódica y así obtener los mejores modelos, teniendo en cuenta que la preparación de los datos es fundamental para la calidad de estos modelos. El tratamiento de los datos consta de:

- *Análisis de análisis de valores anómalos.* Los valores anómalos u *outliers*, son valores atípicos en el proceso. Se pueden dar por que hubo un error en la adquisición y escritura del dato, o por que el proceso sufrió algún cambio o desvió, sea en sus materias primas, equipos u otros. En la figura 1, se muestra el diagrama de box-plot el cual es una herramienta utilizada para detectar los *outliers*.

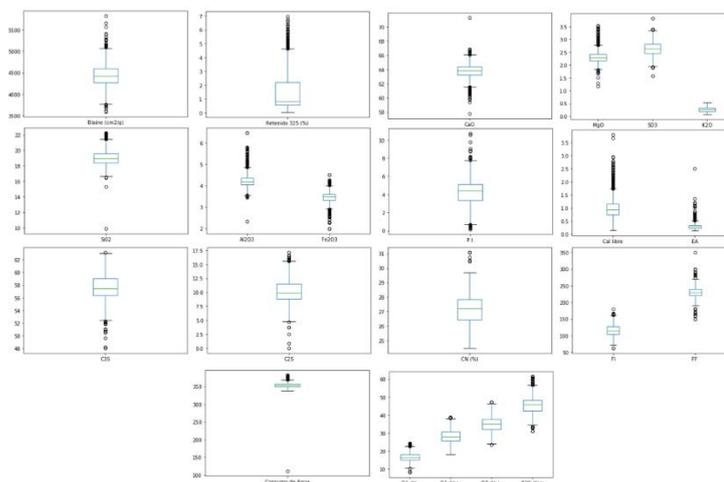


Figura 1. Análisis de datos anómalos mediante la técnica de Box-plot. Datos experimentales

En la Figura 1, se aprecian los valores anómalos por fuera de del rango mínimo y máximo del diagrama de caja. Se tomó la decisión de dejar los valores atípicos que estuvieran relacionados con cambios en los materiales y por ende cambios en los procesos, ya que los modelos predictivos deben ser robustos. a estos cambios y son cambios que es muy probable que vuelvan a presentarse. Estos valores atípicos relacionados con algún cambio en el proceso concuerdan con los valores atípicos leves que indican [10] y [11].

Los valores atípicos que tenían una explicación por alguna variación en el proceso son los valores anómalos leves, que caen entre $(Q1 - 1.5 IQR, Q3 + 1.5 IQR)$, y los que no poseen una explicación por el proceso y que se denominan valores anómalos extremos, caen en el rango de $(Q1 - 3.0 IQR, Q3 + 3.0 IQR)$ siendo IQR el rango intercuartílico detallado que es la distancia entre el Cuartil 1 ($Q1$) y Cuartil 3 ($Q3$). Los datos que están por fuera del rango $(Q1 - 3.0 IQR, Q3 + 3.0 IQR)$ sin explicación desde el punto de vista de proceso se eliminaron, tal cual se aprecia en la Figura 2.

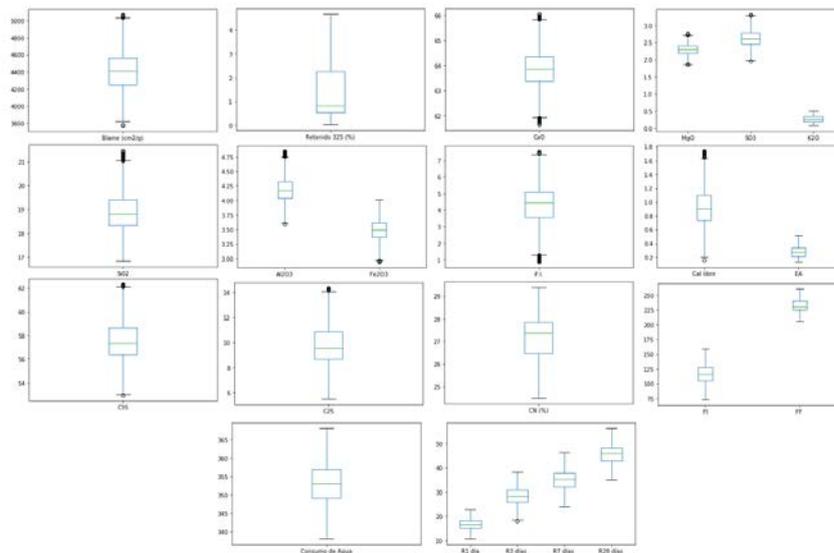


Figura 2. Datos en diagrama de Boxplot, después de eliminación de valores atípicos. Datos experimentales

1. *Eliminación de duplicados e Imputación de valores perdidos.* Tanto para las variables de control de molienda como Blaine y %RetenidoM325, los parámetros de hidratación de la pasta de cemento como son Consumo de Agua, Consistencia (CN%), FI, FF, las variables químicas de control de molienda, así como para los valores de desempeño del cemento como son R1día, R3días, R7días y R28días, no superan el 1% de valores perdidos para cada variable. De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta lo que se indica en [6], donde el criterio de eliminación del registro es para datos perdidos mayor al 20%, aunque algunos autores como [12], indican que este valor crítico es mayor a 60%. La base de datos propuesta para el estudio no posee altos índices de valores perdidos o faltantes y por ende ninguna instancia se elimina.

Por lo tanto, para la imputación de estos datos faltantes y teniendo en cuenta que en algunas variables se tiene alta colinealidad como es el caso de Na₂O con K₂O y EA, PI con % de caliza y % de Clinker, SO₃ con él % de Yeso etc., se utilizará el método de regresión lineal, y para los demás casos donde no aplique la regresión lineal, se utilizará el método de imputación mediante una medida de tendencia central como la mediana. Sin embargo, debido al bajo número de valores faltantes las distribuciones de cada variable no varían con la imputación.

2. *Análisis de colinealidad o multicolinealidad.* En los modelos lineales múltiples los predictores deben ser independientes. La colinealidad ocurre cuando un predictor está directamente relacionado con otro o cuando es la combinación lineal de otros predictores. Si existe colinealidad no se puede determinar el efecto de cada una de estas variables sobre la variable respuesta, lo que se traduce en un aumento de la varianza de los coeficientes de regresión, que conlleva a que no se puede determinar su significancia estadística en el modelo. Además, un pequeño cambio en los datos podría ocasionar grandes cambios en los estimadores de los coeficientes. Aunque, la colinealidad de manera más estricta es cuando entre dos o más variables su correlación es 1 [13], esto no ocurre frecuentemente, pero sí es frecuente encontrar casi-colinealidad o multicolinealidad no perfecta.

Para la determinación de la colinealidad no existe un único método, ni el método correcto. Sin embargo, en [13] se exponen varias reglas prácticas para establecer en nivel de colinealidad entre variables, se puede hacer la regresión lineal múltiple y si el coeficiente de determinación R^2 es alto, pero ninguno de los predictores es significativo, hay indicios de colinealidad. Así mismo, se puede calcular la matriz de correlación entre cada par de variables y si al determinar la correlación r este es alto, algunos autores como [13], indican que si es un valor mayor a 0.7 es indicio de colinealidad.

Sin embargo, uno de los métodos más prácticos de determinación de colinealidad es el factor de Inflación de Varianza (VIF) ecuación (1) y el método de tolerancia (TOL) se muestra en la ecuación (2).

$$VIF_{\beta_j} = \frac{1}{1-R^2} \quad (1)$$

$$Tolerancia_{\beta_j} = \frac{1}{VIF_{\beta_j}} \quad (2)$$

Cuando el VIF es 1 indica ausencia total de colinealidad.

1<VIF<5: la regresión puede verse afectada por alguna colinealidad.

5<VIF<10: es muy preocupante, y seguramente existe colinealidad entre variables que afecten la regresión.

Y con VIF >10, la colinealidad es alta.

El valor de la tolerancia (TOL) al ser el inverso del factor de inflación de varianza (VIF) se maneja los parámetros entre 1-0.1. siendo 1 ausencia de colinealidad, entre 1 y 0.2 puede haber colinealidad, y entre 0.2 y 0.1 hay colinealidad entre las variables. En este caso se realiza el análisis de correlación teniendo en cuenta la matriz de correlación de todas las variables y aquellas que presentan alta correlación se muestran en la Figura 3.

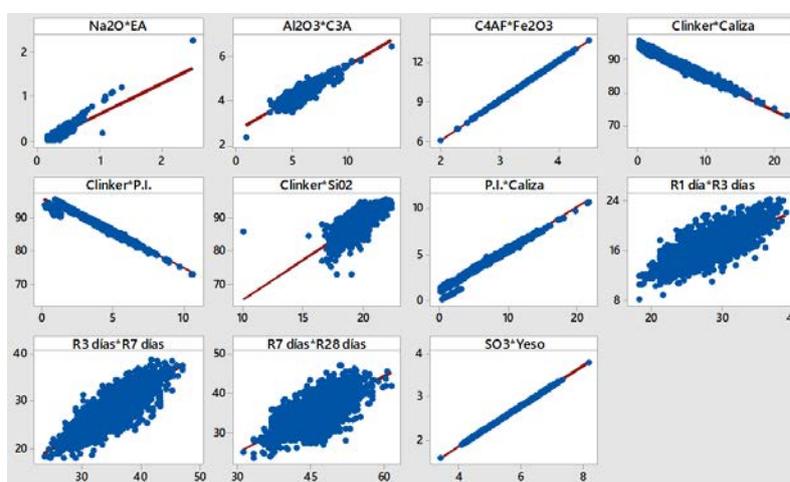


Figura 3. Matriz de correlación entre variables con correlación mayor a 0.7. Datos experimentales del presente estudio

En la Figura 3 se observan las correlaciones por encima de 0,7 de las variables: %Na2O y %EA, esto debido a que el EA (Equivalente Alcalino, es una variable dada por una relación con el% Na2O), es decir la una es función de la otra. Así mismo, se observa correlación de %Al2O3 con %C3A, %Fe2O3 con %C4AF, %Clinker con % de Caliza (en este caso una correlación alta negativa), % Clinker con %P.I también alta pero negativa, % de Clinker con %SiO2, %P.I con % de Caliza y % SO3 con % Yeso. Todas estas correlaciones son coherentes en la industria cementera; por ejemplo, el contenido de SO3 en el cemento proviene del yeso. Igualmente, el mineral C4AF y C3A proviene del Clinker y éstos están formados por los contenidos de Fe2O3 y Al2O3 en la materia prima con la que se produce el Clinker.

De acuerdo con esta posible correlación entre variables, se calcula el factor de inflación de varianza VIF que se muestra en la Tabla 2, donde se puede identificar más claramente las variables que poseen alta colinealidad.

Tabla 2. Factor de Inflación de Varianza (VIF). Para los parámetros más correlacionados de la base de datos

Relación Variable	VIF	r
EA-Na2O	2,79	0.805
SO3-%Yeso	5.000	0.999
%P.I-%Clinker	29,94	-0.983
%Clinker-%Caliza	34,24	-0.985
%Al2O3-%C3A	5,36	0.902
%Fe2O3-%C4AF	10.000	0.999
%Clinker-%SiO2	2.37	0.762
%P.I-%Caliza	31.85	0.984
R1-R3	2,46	0,772
R3-R7	3,79	0,858
R7-R28	2,09	0.725

Según los resultados de correlación y de valor de inflación de Varianza, existen algunos atributos o variables que poseen alta correlación e indican colinealidad, lo cual sirve para eliminar variables redundantes que de cierta

forma miden lo mismo y al eliminarlas se reduce la dimensionalidad de la base de datos. De este análisis de colinealidad se decide eliminar las siguientes variables: EA, %Yeso, %Clinker, % Caliza, %C3A, %C4AF. Las variables de desempeño como R1, R3, R7 y R28, son las variables respuesta, R28 es la variable que se desea predecir, y R1, R3, R7, son variables que para obtenerlas se requiere de un tiempo prolongado, y por esta razón no se utilizarán en los modelos ya que el objetivo es el control de procesos de manera rápida y precisa.

3. *Reducción de la dimensionalidad.* Durante el análisis de colinealidad, se encontraron variables con alto grado de colinealidad que se eliminaron, reduciendo así la dimensionalidad de la base de datos de 29 variables a 18 variables predictoras y una variable objetivo que es la resistencia a 28 días. Debido a esto, no se realizó reducción de dimensionalidad por medio de otras técnicas como análisis de componentes principales, ya que se considera que 18 variables son suficientes para la implementación de los modelos predictivos de clasificación.
4. *Balanceo de la base de datos.* en la preparación de los datos, para el proceso de clasificación, se evidenció, que los valores por debajo de 43.4 Mpa, es decir producto no conforme, catalogado como 0, eran muy inferiores a los datos catalogados como 1 (producto conforme). Debido a esto y como se indica en [21] y [22] se utilizó la de sobre muestreo (*oversampling*), mediante la técnica SMOTE (*Synthetic Minority Oversampling Method*), el cual es un método de sobre muestreo de muestras sintéticas, que se logran producir a partir de las muestras reales, teniendo en cuenta una instancia sintética a partir de los vecinos cercanos al dato real.

El balanceo de la Figura 4, permitió, mejorar considerablemente, la clasificación de producto no conforme catalogado como 0 de manera correcta. Lo cual se evidencia en los resultados de los modelos. Al finalizar el tratamiento de los datos, se obtuvo una base de datos de 18 variables predictoras, 1 variable objetivo, y 3581 instancias reales. Pero con el balanceo este valor se llevó a 5400.

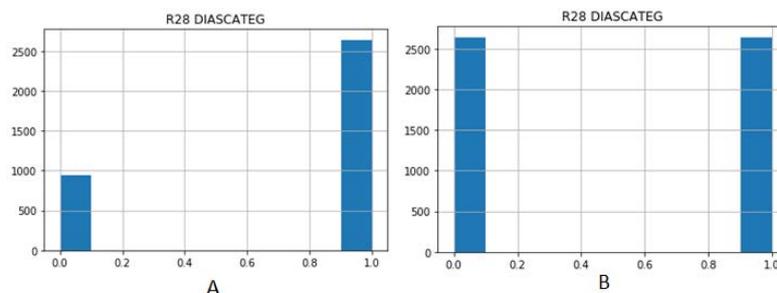


Figura 4. Resultados del balanceo de la base de datos, mediante el método SMOTE. Base de datos sin balancear (A), base de datos balanceada (B). Datos experimentales

La variable objetivo que es la resistencia a 28 días, dada en mega pascales (Mpa), se modificó para que pudiera ser afín a un modelo de clasificación. Este cambio se realizó de la siguiente manera. Según la norma técnica colombiana, un cemento de tipo concretero debe poseer una resistencia mínima a 28 días de 43.4 Mpa. Así, las resistencias por encima de este valor se le asignó el valor de 1, y las resistencias por debajo de este valor es decir el producto no conforme se le asignó el valor de 0. Con esto nuestro modelo de clasificación deben clasificar y predecir la resistencia entre 0 y 1 (no conforme y Conforme).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Modelos planteados

Se plantearon seis modelos predictivos:

1. *Regresión logística.* La regresión logística simple, es un método que permite estimar la probabilidad de una variable cualitativa binaria en función de una variable cuantitativa. En su estudio, [14] indica que una de las principales características de la regresión logística es la clasificación binaria. Como su nombre lo indica es un modelo de regresión que modela el logaritmo de la probabilidad de pertenecer a cada grupo. Esta asignación final se hace en función de las probabilidades predichas. De acuerdo con lo anterior, se podría codificar una variable binaria con 0 y 1, y luego aproximar por medio de una regresión lineal por mínimo cuadrados $\beta_0 + \beta_1 X$.

Sin embargo, como lo indica [14], esta aproximación tiene una falencia y es que cuando los valores de X son extremos, por medio de la extrapolación de la ecuación lineal, daría como resultados valores de Y menores que 0 o mayores que 1, contradiciendo el hecho que las probabilidades están en el rango [0,1]. Para evitar este problema la regresión logística transforma el valor devuelto de la aproximación lineal utilizando la función sigmoide que se muestra en la ecuación (3).

$$\text{Funcion Sigmoide} = \sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (3)$$

Con la función sigmoide, descrita en la ecuación (3), se garantiza un resultado entre 0 y 1, cuando el valor del predictor X es grande positivo, e^{-x} se vuelve 0, dando como resultado $\sigma(x) = 1$, para valores negativos, e^{-x} tiende a infinito por lo tanto $\sigma(x) = 0$. Sustituyendo x por la función lineal $\beta_0 + \beta_1 X$ se obtiene la ecuación (4).

$$P(Y = k|X = x) = \frac{1}{1+e^{-(\beta_0+\beta_1 X)}} = \frac{1}{\frac{e^{(\beta_0+\beta_1 X)}}{e^{(\beta_0+\beta_1 X)}} + \frac{1}{e^{(\beta_0+\beta_1 X)}}} = \frac{1}{\frac{1+e^{(\beta_0+\beta_1 X)}}{e^{(\beta_0+\beta_1 X)}}} = \frac{e^{(\beta_0+\beta_1 X)}}{1+e^{(\beta_0+\beta_1 X)}} \quad (4)$$

Donde $P(Y = k|X = x)$, es la probabilidad de que la variable cualitativa Y tome el valor k, dado que el predictor X tome el valor de x; esta expresión puede ajustarse a su versión logarítmica de la siguiente forma en la ecuación (5).

$$\ln = \frac{P(Y = k|X = x)}{1-P(Y = k|X = x)} = \beta_0 + \beta_1 X \quad (5)$$

La regresión logística múltiple, ecuación (6), conlleva todos los conceptos de la regresión logística simple, pero ampliando el número de predictores; éstos pueden ser continuos o categóricos.

$$\ln = \frac{P}{1-P} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n \quad (6)$$

De acuerdo con lo anterior tenemos que la probabilidad, ecuación (7).

$$P(Y) = \frac{e^{(\beta_0+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\beta_3 X_3+\dots+\beta_n X_n)}}{1+e^{(\beta_0+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\beta_3 X_3+\dots+\beta_n X_n)}} \quad (7)$$

Que se interpreta como la probabilidad de Y cuando los predictores X toman sus respectivos valores $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$.

En consecuencia, se crea la regresión logística para los datos de la investigación, teniendo en cuenta que en la preparación de los datos ya se clasificó el producto no conforme que tiene una resistencia a la compresión menor a 43,4 Mpa como 0, y las resistencias por encima de este valor o igual se clasifican como 1, que sería producto conforme. La Figura 5 muestra la gráfica de clasificación de la regresión logística.

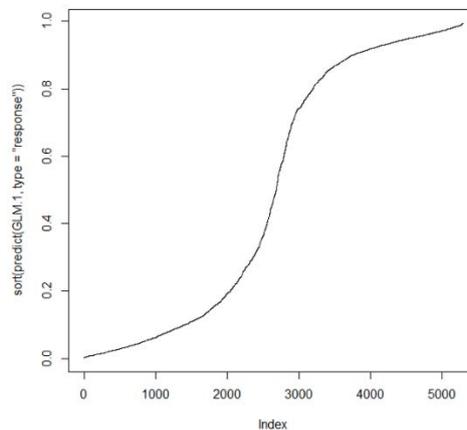


Figura 5. Modelo de regresión logística para la clasificación de resistencia a la compresión en 0 No conforme y 1 Conforme. Datos experimentales

La ecuación (8) indica la probabilidad de obtener un cemento concretero con una resistencia a 28 días por encima de 43.4 Mpa, de acuerdo con las variables predictoras del modelo.

$$P(Y) = \frac{[e^{(-29.135 - 0.00139*Blaine - 0.176*C2S + 0.095*C3S - 0.913*Cal.libre + 1.127*CN + 0.0165*Consumo.de.Agua - 1.1785*EA - 0.4832*Fe2O3 + 0.017*FF - 0.028*FI + 0.8649*MgO - 1.3431*Retenido325 - 0.36176*SiO2 + 1.8346*SO3)}]}{[1 + e^{(-29.135 - 0.00139*Blaine - 0.176*C2S + 0.095*C3S - 0.913*Cal.libre + 1.127*CN + 0.0165*Consumo.de.Agua - 1.1785*EA - 0.4832*Fe2O3 + 0.017*FF - 0.028*FI + 0.8649*MgO - 1.3431*Retenido325 - 0.36176*SiO2 + 1.8346*SO3)}]} \quad (8)$$

2. **Árbol de decisión.** En la Figura 6 se puede observar un árbol de decisión, en el cual se utilizan en las particiones iniciales de los datos las principales variables según el nivel de pureza que aportan al nodo. Al finalizar se puede observar el valor de Y el cual es la mediana de los n valores que se encuentran en esa instancia [23].

En la Figura 6 se aprecia el árbol de clasificación para identificar si el cemento cumple con estándares de calidad de resistencia a 28 días. Para evaluar la capacidad de clasificar de este modelo se utilizan las mismas medidas que en la regresión logística: matriz de confusión y el área bajo la Curva ROC.

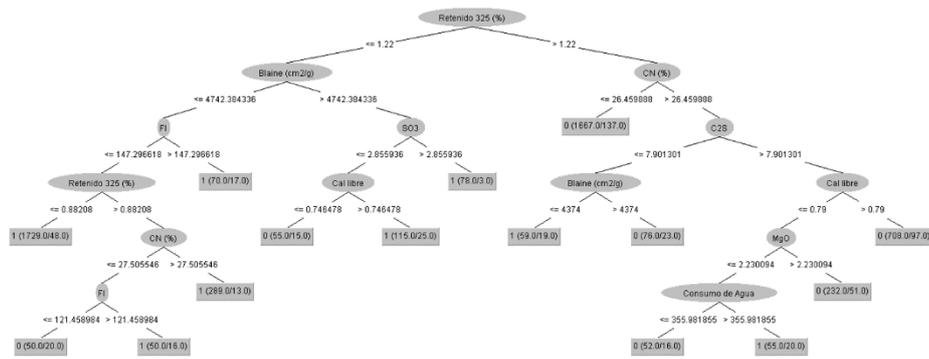


Figura 6. Árbol de decisión para la clasificación de resistencias a la compresión. Datos experimentales

3. *Random Forest.* Teniendo en cuenta los resultados anteriores, y como lo explica [15], la predicción con un único árbol puede ser muy limitada y por ello se emplean otros modelos como el *Random forest*, en donde se construyen varios árboles para mejorar la predicción y reducir el sobreajuste.

En la Figura 7, se puede observar cómo el error en la medida de predicción va disminuyendo a medida que se obtienen más árboles de decisión y se evidencia que a partir de aproximadamente 100 árboles ya se estabiliza la precisión del modelo. Luego, se obtiene el gráfico de importancia en la clasificación de cada variable mediante el *IncNodePurity* que se aprecia en la Figura 8. El *IncNodePurity*, como lo explica [16], indica qué está directamente relacionado con la función de pérdida según las mejores divisiones. Este valor de pureza indica las variables más influyentes para realizar la clasificación y por ende están en la parte superior del árbol. En este sentido, las variables Retenido 325, P.I, Blaine, CN, CaO, Fi, Cal.Libre son las variables que más aportan o influyen en la clasificación.

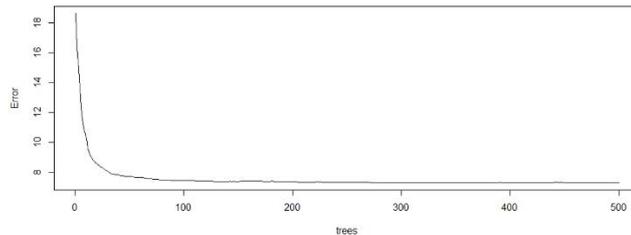


Figura 7. Gráfico del error con respecto al número de árboles en el random forest. Datos experimentales

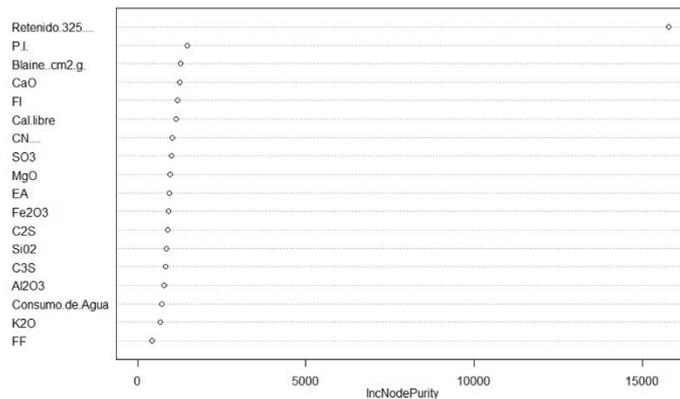


Figura 8. Importancia de las variables en el modelo de predicción de random forest. Datos experimentales.

4. *Modelo K vecinos más cercanos KNN.* El algoritmo de K vecinos más cercanos o KNN, como lo indica [17], conserva las instancias con las que es creado, no genera modelo durante su entrenamiento y por eso es llamado de manera coloquial como perezoso (*lazy*). En este modelo los nuevos casos los clasifica de acuerdo con las similitudes que tengan con los ya existentes. Es decir, los nuevos casos los clasifica como la clase mayoritaria de entre los k vecinos más cercanos de entre los datos de entrenamiento. A diferencia de los modelos de regresión lineal, el método de KNN es no paramétrico, por tanto, no hace suposiciones acerca de la distribución que tienen los datos.
5. *Modelo de máquina de soporte vectorial.* Las máquinas de soporte vectorial (SVM) fueron creadas en los años 90 en los laboratorios de AT&T, como lo indica [18], para solucionar problemas de clasificación y regresión. En los trabajos [18] y [23] se exponen algunas de las generalidades de las SVM, entre ellas que la base de su funcionamiento es el poder proyectar el conjunto de datos a una dimensión superior aplicando una función Kernel, y en este nuevo espacio se aplica un hiperplano que logre separar las clases del conjunto de datos. En la máquina de soporte vectorial para clasificación, los mejores resultados se lograron con el Kernel Gaussiano RBF.

6. *Modelo de redes neuronales.* Como lo expresa [19] las redes neuronales artificiales, de acuerdo con su constitución y fundamentos, presentan numerosas similitudes con las neuronas cerebrales y debido a esto tienen entre sus capacidades las de aprender de la experiencia, generalizar casos, abstraer características esenciales. Debido a lo anterior, diferentes áreas del conocimiento están aplicando esta tecnología a sus procesos, en [20] y [23] se describe una neurona artificial como un elemento de proceso donde por medio de un conjunto de entrada x_i o vector x se obtiene una única salida y . En el modelo de clasificación, el mejor modelo se logró con una red neuronal de 10 nodos y una sola capa oculta, con la que se obtuvieron buenos resultados. La Figura 9 presenta el modelo de red neuronal que mejor se ajustó a los datos.

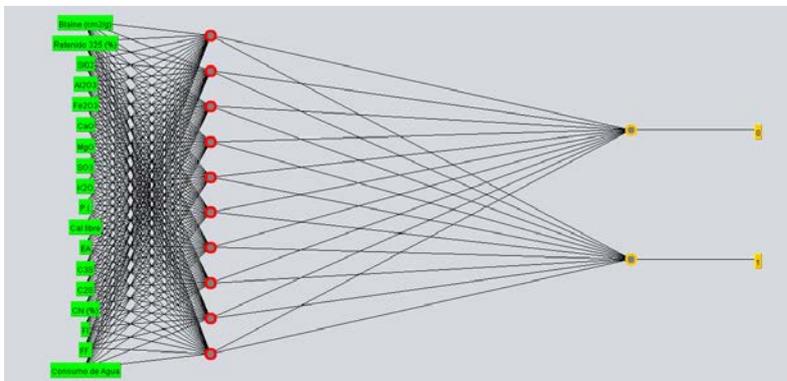


Figura 9. Red neuronal con 10 nodos, función de activación Sigmoide. Datos experimentales

Finalmente, todos los modelos se realizaron con las herramientas Python, R y WEKA, y los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de los modelos de predicción planteados para determinar la resistencia del cemento a 28 días

Algoritmo Utilizado	Precisión	Cobertura	Media Armónica	Área ROC
Regresión Logística	0.879	0.879	0.879	0.919
Árbol de regresión	0.900	0.915	0.900	0.920
Random Forest	0.945	0.944	0.944	0.986
KNN	0.937	0.937	0.939	0.937
SVM	0.883	0.882	0.883	0.882
Red Neuronal	0.906	0.905	0.906	0.939

No se pudo establecer comparación con el estado del arte, debido a que no se encontraron investigaciones o trabajos previos que utilizaran los modelos de clasificación, en la predicción del desempeño de materiales. Sin embargo, se evidencia que todos los modelos poseen buen desempeño, ya que todos poseen datos de precisión, cobertura, media armónica y área ROC, por encima de 0.88, indicando una buena clasificación de las resistencias en conforme y no conforme, especialmente el random forest y K vecinos más cercanos que poseen los valores más altos en todas las métricas de calidad de los modelos.

3.2 Predicción con datos nuevos

Es importante indicar que los datos para el ejercicio de predicción son totalmente independientes de la base de datos de entrenamiento y test con los que se desarrollaron los modelos. En la Figura 10 se aprecia cómo el modelo de *random forest* da los mejores resultados, seguido del modelo de KNN, además los modelos de redes neuronales, y máquina de soporte vectorial SVM, podrían mejorarse con más datos.

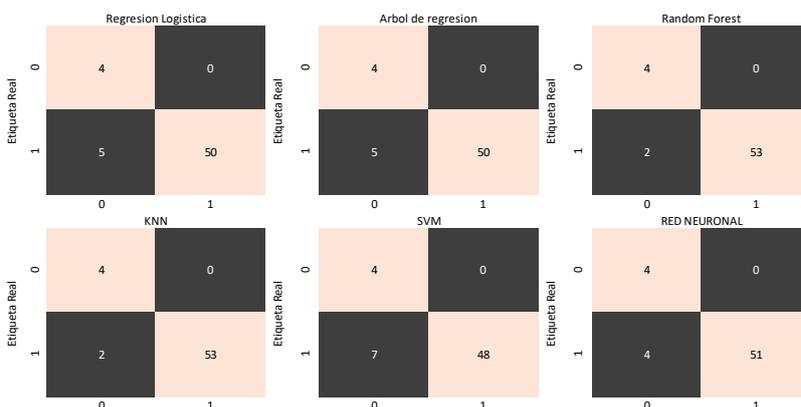


Figura 10. Comparación de los resultados predichos por los modelos de clasificación con los datos de resistencias reales dadas por planta. Datos experimentales

En estos resultados, se aprecia como en el modelo de random Forest, 2 muestras que eran conformes, las catalogo como 0 es decir falsos negativos, igualmente en el modelo de KNN, 4 datos que eran producto conforme los clasifico como producto no conforme. Igualmente, el modelo de Regresión logística, falló 5 veces en clasificar correctamente los conformes y los clasifico como no conforme, y así mismo, el árbol de decisión, la máquina de soporte vectorial se equivocó en 7 clasificaciones, y la red neuronal en 4. Sin embargo, todos los modelos hicieron correctamente las clasificaciones de los no conformes, catalogados como 0, es decir ningún modelo presentó falsos positivos. Indicando que, aunque la clasificación no fue 100% correcta en general, los modelos son muy sensibles a detectar productos no conformes, y clasificarlos correctamente, lo que indica un gran avance para la industria, y para el control de calidad del cemento.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de los modelos de clasificación, el mejor modelo para la predicción de datos de resistencia es el *random forest*, logrando una precisión de 0.94 y un área ROC de 0.99. Este estudio demuestra que los modelos de aprendizaje de máquina de clasificación pueden ser utilizados en el control predictivo de la calidad del cemento durante su producción y pueden convertirse en una herramienta de optimización para la industria ya que cuentan con una alta sensibilidad para clasificar y predecir producto no conforme. Sin embargo, solo abarca las características químicas, físicas, y mineralógicas del material y aunque con estas características se puede predecir la resistencia a la compresión, para realizar una optimización del proceso de manera holística se requiere de la captura de otro tipo de información referente a la operación como la velocidad del separador del molino, consumo eléctrico del molino, costos de las materias primas, etc. y así abarcar metodologías más complejas de aprendizaje de máquina.

En cuanto a los resultados de predicciones con datos independientes a los modelos, el modelo de *random forest* fue el de mejor desempeño seguido por el KNN. Estos dos fallaron en la predicción de producto conforme y lo catalogaron como no conforme, y aunque se considera como un error en la clasificación permisible. Como un buen resultado se aprecia que todos los que son producto no conforme los logró clasificar bien, y no generó falsos positivos ninguno de los dos modelos.

REFERENCIAS

- [1] Taylor, H. (1997). Cement Chemistry. Thomas Telford.
- [2] Hewlett, P. (1998). Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Elsevier.
- [3] Wsselsky, A. (2009). Synthesis of pure Portland cement phases. Cement and Concrete Research, 39(11), 973-980.
- [4] Castanon, S. (2011). A Research of the Mineralogy Phases of Clinker in a Spanish Cement Using the Method of Rietveld. Revista Facultad Nacional de Minas, 73(173) 41-47.
- [5] Ludwing, H. y Zhang, W. (2015). Research review of cement clinker chemistry. Cement and Concrete Research, 78, 24-37.
- [6] Hernandez, C. y Rodriguez, J. (2008). Preprocesamiento de Datos Estructurados. Vinculos, 4(2), 27-45.
- [7] Pyle, D. (1999). Data Preparation for Data Mining. Morgan Kaufmann Publishers.
- [8] Useche, L. y Mesa, D. (2006). Una introducción a la Imputación de Valores Perdidos. Terra Nueva Etapa, 67, 127-151.
- [9] Vela, F. (2010). Normalidad de los errores. Universidad Autónoma Metropolitana.
- [10] Lottati, M., Aucoin, D. y Bruyette, D. (2019). Expected total thyroxine (TT4) concentrations and outlier values in 531,765 cats in the United States (2014–2015). Plos One, 14(3), 1-12.
- [11] Moreno, J. (2012). Método de detección de Outliers. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana.
- [12] Kelleher, J., Mac Namee, B. y D'Arcy, A. (1974). Fundamentals of machine learning for predictive data analytics. MIT Press.
- [13] Del Valle, J. y Guerra, W. (2012). The Multicollinearity in Multiple Lineal Regression Models. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 21(4), 80-83.
- [14] Peng, C. (2002). The Use and Interpretation of Logistic Regression in Higher Education Journals: 1988–1999. Research in Higher Education, 43(3), 259–293.
- [15] Amat, J. (2019). Ciencia de Datos, Estadística, Programación y Machine Learning. Recuperado: <https://github.com/JoaquinAmatRodrigo>.
- [16] Saha, D., Alluri, P. y Gan, A. (2015). A random forests approach to prioritize Highway Safety Manual (HSM) variables for data collection. Journal of Advanced Transportation, 50, 522–540.
- [17] Aller, R. (2019). Clasificadores KNN-I curso Universidad Carlos III de Madrid. Recuperado: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-informatica/analisis-de-datos/transparencias/KNNyPrototipos.pdf>.
- [18] Sanchez, N. (2015). Máquinas de soporte vectorial y redes neuronales artificiales en la predicción del movimiento USD/COP spot intradiario. Observatorio de Económica y Operaciones Numéricas, 9, 113-172.
- [19] Matich, D. (2001). Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones. Catedra. Universidad Tecnológica Nacional.
- [20] Yeh, I. (1998). Modeling of strength of high performance concrete using artificial neural networks. Cement and Concrete Research, 28(12), 1797-1808.
- [21] Wei, Q. y Dunbrack, R. (2013). The Role of Balanced Training and Testing Data Sets for Binary Classifiers in Bioinformatics. Plos One, 8(7), 1-12.
- [22] Arnejo, H. (2017). Métodos para la mejora de predicciones en clases desbalanceadas en el estudio de bajas de clientes (CHURN). Tesis de Maestría. Universidad de Santiago de Compostela.
- [23] Young, B. et al. (2019). Can the compressive strength of concrete be estimated from knowledge of the mixture proportions? New insights from statistical analysis and machine learning methods. Cement and Concrete Research, 115, 379-388.

Diseño de una plataforma de E-commerce para el sector de alimentos

Edwin Barrientos Avendaño
Miguel Alberto Rincón Pinzón
Universidad Popular del Cesar
Colombia

El comercio electrónico en Colombia viene creciendo cada vez más, los últimos meses según estadísticas de la Cámara Colombiana de Comercio Electrónico y el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), en mayo del 2020 se realizaron 4,22 millones de transacciones digitales, que corresponden a unos \$535.000 millones en ventas, dichas estadísticas están en crecimiento debido al proceso de aislamiento por la pandemia que estamos viviendo y es aquí donde la compañía alimenticia Tu Pan Gourmet S.A.S de la mano del programa de fábricas de productividad del ministerio de Comercio, Industria y Turismo la cual estableció unas consultorías para mejorar la productividad del sector industria en Colombia, dicha consultoría estableció para dicha compañía, la estrategia encaminada a lograr llegar a nuevos mercados y comenzar un proceso de fidelización de clientes desarrollando una plataforma web para realizar ventas online de los diferentes productos que la compañía produce y vende en el mercado local de Ocaña y su área de influencia. Por lo anterior; este trabajo de investigación aplicada busco mostrar los resultados del apoyo prestado por parte de la universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica en el desarrollo del aplicativo específico a los procesos de negocio de la panificadora bajo estándares de calidad basados en una metodología de desarrollo ágil, cumpliendo con estándares de calidad de software web, estableciendo controles a nivel de ciberseguridad en aspectos de transacciones web, con un enfoque de la industria 4.0 donde se logró al final la programación de un algoritmo de inteligencia artificial conocido como Clustering k-means el cual permitirá en un futuro a la empresa segmentar sus clientes de acuerdo a sus preferencias y frecuencias de compras, con el objetivo de fidelizar clientes bajo la estrategias de la empresa de llevar pan del horno a la casa.

1. INTRODUCCIÓN

La industria 4.0 o cuarta revolución industrial [1] como muchos autores la han llamado a traído consigo una seria de tecnologías como automatización, inteligencia artificial [2], BigData [3], El Internet de las cosas (IoT) [4], Cloud computing [5], simulaciones, Ciberseguridad [6], que al ser adaptadas a la industria panificadora se lograría ser más productivos en aspectos como producción, comercialización y toma de decisiones. En la actualidad las empresas están viviendo desafíos a nivel empresarial causado por la pandemia del Coronavirus o covid-19, en donde la forma de comercialización de ciertos productos requiere de una nueva visión de cómo se debe llegar a los usuarios finales o consumidores.

La compañía alimenticia Tu Pan Gourmet SAS [7], es una empresa dedicada a la producción y comercialización de productos de panadería tradicionales de la región de Ocaña Norte de Santander, la cual durante los 9 años han logrado posicionarse en el mercado de la región a través de puntos calientes ubicados en la ciudad de Ocaña y municipios aledaños. Dicha empresa con el ánimo de lograr llegar a nuevos mercados como Bucaramanga, Cúcuta, Valledupar, a finales de año anterior fue beneficiaria del gobierno nacional del programa Fábricas de Productividad [8] a través del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, liderado por Colombia Productiva, entidad aliada de las industrias para producir más, con mejor calidad y mayor valor agregado por tal razón unos de los resultados del programa fue dar comienzo desde el principio de año la construcción de una plataforma web que le permitiera realizar ventas online al detalle y al por mayor que se adaptará a su modelo de negocios, ya que al contar con múltiples líneas de producción como panes ultra-congelados, pan tradicional para supermercados, hoteles, restaurantes y cafeterías, hacen de la plataforma particular a las necesidades de la compañía alimenticia.

En este proyecto se logró un sistema integrado para controlar diferentes frentes de la cadena de negocio tales como: ventas, inventarios y producción, con módulos de gestión financiera para la toma de decisiones en tiempo real, lográndose implementar algoritmo inteligente para el procesamiento de datos que permitiendo a los dueños del negocio tomar decisiones en múltiples frentes como el análisis de comportamientos de clientes y ventas, adicionalmente por ser una plataforma online se desarrolló con complementos en aspectos de ciberseguridad [6] para lograr tener seguridad sobre los datos.

2. MÉTODO

La investigación aplicada objeto de estudio tuvo como principio desarrollar una plataforma de E-commerce [9] con características específicas a las necesidades de la compañía alimenticia Tu Pan Gourmet SAS, soportados por una metodología de investigación descriptiva [10] que nos permitió obtener todas las relaciones de los objetos y clases involucrados en los procesos de negocios de la empresa tales como producción, inventario, comercialización, gestión de clientes y gestión financiera junto al análisis de datos para la toma de decisiones en tiempo real, con un enfoque cualitativo [10] recolectando información para su posterior análisis que nos permitiera entender lo que el cliente quería de la plataforma llenando todas sus expectativas, resolviendo sus dudas y preguntas sobre el proceso de investigación, explorando y validando constantemente del lado de los interesados del sistema. En la Tabla 1 se identifica la población y muestra de la investigación, la cual estuvo dada por la gerencia de la compañía alimenticia Tu

pan Gourmet y los diferentes jefes de procesos de producción, comercialización e inventario a los cuales se les aplico unas técnicas de recolección de información como la entrevista y la observación ya que fueron las que mejor se adaptaban para entender de la mejor manera los distintos procesos y sus relaciones.

Tabla 1. Involucrados en la investigación

Involucrados	Población	Instrumento
Gerencia	1	Entrevista
Jefe de producción	1	Entrevista y observación
Jefe de comercialización	1	Entrevista
Jefe de inventario y despacho	1	Entrevista y observación

2.1 Metodología de desarrollo de software

Para lograr conseguir un software de calidad [11] que nos permitiera en su construcción controlar todo los aspectos metodológicos como asegurar la uniformidad, satisfacer las necesidades de los usuarios del sistema, mayor nivel de rendimiento y eficiencia, ajustarse a los plazos y costes previstos en la planificación y demás aspectos que nos otorgan las metodologías se decidió utilizar el marco de trabajo Ingeniería web o IWeb [12] cuyo objetivo es obtener una aplicación web que cumpla con los requerimientos en el tiempo previsto y dentro del presupuesto. De esta manera, se utilizarán herramientas y técnicas que harán único el proceso de desarrollo de la aplicación con un conjunto coherente de tecnologías y artefactos que se necesitan para desarrollar, implantar y mantener el producto web, en el cual se ejecutara en el World Wide Web.

2.1.1 Actividades de la IWeb

Una vez se identificó la metodología a utilizar comenzamos a implementar las actividades para el desarrollo de la plataforma web, para poder entender las necesidades de los actores involucrados que son parte fundamental del desarrollo de la aplicación. Por lo tanto, Roger Pressman especifica siete actividades que forman parte del modelo de proceso de la IWeb que son: formulación, planificación análisis, modelización, generación de páginas, test y evaluación del cliente como se muestra en la Figura 1.

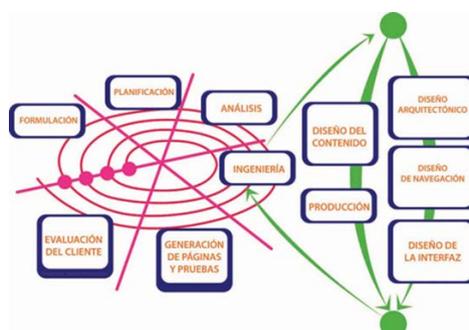


Figura 1. Modelo de procesos Iweb [12]

- **Planteamiento y formulación.** Las actividades que nos permitieron entender mejor la problemática y necesidades de la compañía alimenticia fueron en gran medida la técnica de recolección de información utilizada en el proceso de entender y formular la problemática que la compañía alimenticia necesitaba satisfacer fue la entrevista y la observación, ya que se vio la necesidad de hacer estudio de campo para entender de primera mano los distintos procesos de elaboración, almacenamiento del inventario, comercialización del producto para así interactuar con todos los involucrados Identificando las necesidades y requerimientos del aplicativo web, planteando objetivos del negocio recopilando todos los requisitos funcionales y no-funcionales junto al alcance y limitaciones de tal manera que se lograra entregar un producto mínimo viable para ser testeado y puesto en funcionamiento.
- **Planificación.** El planear nos garantiza minimizar el error y aumentar los criterios de éxito del proyecto [13] , en esta actividad se logra realizar el cronograma de actividades con sus respectivos indicadores y responsables, realizando Análisis de recursos y factibilidad es fundamental ya que nos permitirá conocer todos los recursos necesarios para el desarrollo y puesta en funcionamiento de la plataforma de E-commerce [9] y realizar el análisis de riesgos del proyecto ya que de acuerdo a las investigaciones realizadas no es común en Colombia panaderías virtuales que tengan la logística para realizar entregas eficientes el cual es el gran desafío de la compañía alimenticia Tu Pan Gourmet poder brindar a su clientes un buen servicio acorde a los productos que se van a comercializar a través de la plataforma.
- **Análisis.** El modelamiento de un sistema es fundamental cuando se desarrolla software [14] ya que este le permite al equipo de trabajo tener una visión global sobre cómo operaría el sistema, permitiendo que exista un engranaje entre todos los aspectos que involucran en el diseño, desarrollo e implementación, desde la identificación de roles y perfiles de usuarios, flujos de información en el sistema, componentes de software y hardware, por tal razón la

ingeniería web [15] en esta actividad se logra obtener los distintos modelos del sistema orientados a obtener una visión más detallada de lo que se quiere del sistema como: Modelos de contenidos, Modelado de interacción, Modelado funcional, Modelado de configuración, Análisis navegación del sitio, Revisión y corrección de errores siempre del lado del cliente quien debe ir validando todo el tiempo lo que se está definiendo para el sistema.

- *Ingeniería.* Uno de los aspectos importantes para lograr obtener un grado de usabilidad y ergonomía [16] en el manejo del aplicativo es realizar diseños de interfaces que hagan del sistema una buena experiencia para el usuario y es aquí donde la metodología Iweb establece los parámetros para su diseño junto a aspectos de contenidos, diseño de bases de datos y en general una arquitectura acorde a las necesidades de la organización siendo de gran importancia tecnologías del lado del cliente y del servidor que cumplan con políticas de seguridad [17] que minimicen errores en la ejecución de los procesos de negocio de la compañía alimenticia Tu Pan Gourmet.
- *Generación de páginas y pruebas.* Para la generación de páginas con las que interactuaran los clientes se tuvieron en cuenta tecnologías de vanguardia que permitieran que estas fueran adaptativas a cualquier resolución de pantalla, es por esto que el aplicativo web integro múltiples tecnologías en el Frontend [18] como el Framework Bootstrap, JQuery y de esta forma se logró unas páginas amigables a cualquier entorno de ejecución por parte de los usuarios del sistema. Otro aspecto en el desarrollo de software de gran importancia son las pruebas que se hagan sobre el software ya que esto genera aspectos de calidad en el resultado final, por tal razón se planteó el desarrollo de pruebas unitaria a través del FrameWork PHPUnit [19] y pruebas automatizadas soportadas por el conjunto de herramientas de Selenium [20] logrando obtener pruebas de interfaz, de contenido, navegación, configuración y de componentes.
- *Evaluación del cliente.* Iweb es considerado una de las metodologías ágiles [14] capaz de adaptar la forma de trabajo a las condiciones del software que la empresa necesita, logrando flexibilidad, rápidas respuestas para pivotar el proyecto cuando sea necesario en su desarrollo adaptándose a las características puntuales de las empresas ya que todas se mueven en entornos diferentes y en el caso particular la compañía alimenticia Tu Pan Gourmet como panificadora que produce y comercializa al mismo tiempo así lo requieren. Por tal razón la ingeniería web tiene como característica trabajar del lado del cliente a través de entregas parciales[14] de tal manera que si el desarrollo no llena las expectativas de los interesados se puedan tomar correctivos a tiempo y no esperar al final del proyecto; por tal razón, dicha metodología es iterativa entregando informes parciales para la respectiva evaluación del cliente, logrando entregar al final un producto con posibilidades de satisfacción del cliente bastante alta, ya que siempre está presente en el análisis, diseño y desarrollo del software.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis de requisitos funcionales y no-funcionales

Son declaraciones de los servicios que debe proporcionar el sistema, de la manera en que éste debe reaccionar a entradas particulares y de cómo se debe comportar en situaciones particulares [21]. La construcción del software se identificó los requisitos funcionales y no-funcionales producto del análisis de las necesidades de la compañía alimenticia los cuales identificamos algunos en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Requisitos funcionales

Rol Administrador
El Sistema debe permitir al administrador autenticarse y acceder a sus funciones
El administrador podrá listar toda la información acerca de los empleados
El administrador podrá asignar estado de acceso al empleado
El sistema debe permitir al administrador actualizar sus datos personales
El administrador podrá realizar informes en tiempo real sobre comportamientos de ventas
El administrador podrá realizar informes en tiempo real sobre comportamientos de producción
El administrador podrá realizar informes en tiempo real sobre comportamientos de inventarios
Rol producción
El Sistema debe permitir registrar la producción diaria
El sistema debe permitir consultar inventarios de productos
El sistema debe permitir programar producción del día siguiente
El jefe de producción debe poner ver el inventario de materias primas
El sistema debe generar alertas automáticas sobre stock mínimo de productos
El jefe de producción debe poner registrar panes dañados e imperfectos
El jefe de producción debe poner registrar uso de bolsa en cada bache de producción
El sistema debe notificar en tiempo real a clientes sobre salida de pan caliente
Rol jefe de ventas
El Sistema debe permitir monitorear ventas online
El sistema debe permitir generar informe de ventas en tiempo real
El sistema debe poder analizar comportamiento de compras de clientes recurrentes
El sistema debe tener poder parametrizar los productos a destacar en el día
El sistema debe poder promocionar productos de acuerdo a las preferencias de los clientes por ciudades
El sistema debe poder notificar la existencia de pan recién salido del horno a clientes a través de mensajes de texto
El sistema debe permitir a jefe de ventas establecer metas de ventas diarias por productos
El sistema debe generar informes de soporte a campañas de marketing digital

Rol clientes

- El Sistema debe permitir realizar compras online
 - El sistema debe permitir monitorear el estado de las compras realizadas
 - El sistema debe permitir que el cliente realice PQRS
 - El sistema debe permitir revisar el estado del PQRS
 - El sistema debe permitir que clientes se registren al sistema
 - El sistema debe permitir que clientes se gestionen la información de registro en el sistema
-

Los requisitos no-funcionales son restricciones de los servicios o funciones ofrecidos por el sistema; se refiere a las propiedades emergentes de éste como la fiabilidad, el tiempo de respuesta y la capacidad de almacenamiento [21]. Para el proyecto objeto de estudio se tuvieron en cuenta los siguientes requisitos no-funcionales en la Tabla 3.

Tabla 3. Requisitos no-funcionales

El sistema debe ser fácil de usar. Con ayudas e interfaces intuitivas
El sistema debe accederse por medio de un ambiente web y móvil
El sistema debe permitir al usuario autenticarse por medio de un usuario definido y una contraseña cifrada
El sistema debe restringir el ingreso directo por medio de URL utilizando sesiones
El sistema debe tener en cuenta la segregación de funciones de cada usuario
El sistema debe cerrarse después de un tiempo límite de inactividad
El sistema debe funcionar desde cualquier dispositivo electrónico sin importar su sistema operativo
El sistema debe responder en tiempo real las ejecuciones de los usuarios
El sistema debe tener un diseño de colores, botones e imágenes basado en la imagen de la panificadora Tu Pan Gourmet
El sistema debe estar en funcionamiento las 24 Horas al usuario

3.2 Interfaces del sistema

En la Figura 2 se observa la página principal con la estructura de las distintas ciudades donde aliados estratégicos se encargarán de realizar la gestión de los pedidos, una vez se selecciona la ciudad el sistema solo muestra los productos disponibles por ciudad, las líneas de producción de la compañía alimenticia, en dicha página los compradores pueden observar en galería de imágenes los productos que deseen comprar [7].

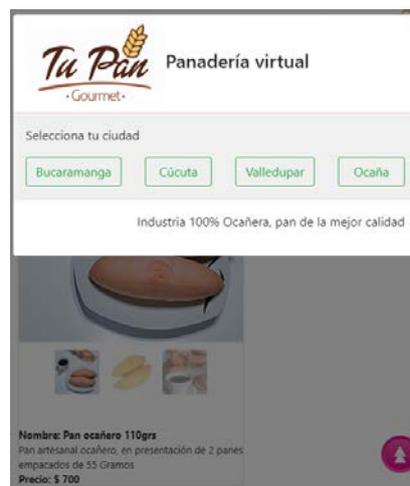


Figura 2. Pagina principal

Una vez las compras son realizadas entran al sistema generando notificaciones automáticas a compradores y jefe de ventas, creándose una trazabilidad del proceso de entrega la cual podrá ser monitoreada por los interesados, a través del panel de administración. En dicho panel se puede monitorear en tiempo real todo lo que ocurre en la plataforma, generando estadísticas de interés para la compañía las cuales sirvan de apoyo para toma de decisiones. En la Figura 3 se observa el ingreso al sistema donde se logró implementar políticas de seguridad y procedimientos seguros que garanticen la disponibilidad, confidencialidad e integridad de los datos [22].



Figura 3. Ingreso al sistema

Unos de los aspectos que se tuvo en cuenta en el desarrollo de la plataforma web fue lograr minimizar el riesgo de tener una incidencia de seguridad, ya que las aplicaciones web en el tiempo han venido presentando multiples vulnerabilidades [23] que requieren un tratamiento en búsqueda de un grado de seguridad aceptable, ya que en terminos de seguridad nunca tendremos una aplicación 100% segura, siempre existira el riesgo de ser comprometida las características primarias de la información como la confidencialidad, la integridad y la disponibilidad de los datos [22], esto debido en gran medida a que los clientes en la web siempre estarán sin control por ser sistemas de acceso público lo que implica el envío constante de datos al servidor [24], por tal razón dichos datos deben tratarse como maliciosos en su totalidad realizando operaciones que permitan filtrar tráfico para así obtener conexiones seguras hacia el aplicativo web. En el desarrollo se tuvieron en cuenta controles [25].

Para ataques como Cross-Site Scripting (XSS) inyectar scripts de lado cliente, Inyección SQL evitando que usuarios maliciosos ejecuten código SQL arbitrario en la base de datos, Cross Site Request Forgery (CSRF) usuario malicioso ejecutando acciones usando las credenciales de otro usuario, Salto de Directorios/Revelación de Ficheros, tratar de ingresar a ficheros del servidor web a los que no debería tener acceso, al final se tuvo en cuenta las recomendaciones dadas por La fundación OWASP donde establecen los 10 principales riesgos de seguridad de las aplicaciones web. Para la realización de pruebas nos basamos en el framework PHPUnit [19]. para las pruebas unitarias, donde cada vez que se iba desarrollando teníamos el reto de ir probando los algoritmos más críticos del sistema e ir documentando a través de casos de prueba identificados en la Tabla 4.

Tabla 4. Documentación Caso de pruebas

Identificador y título			
Función a probar			
Descripción			
Tipo de prueba			
Precondiciones			
Perfil de usuario			
Valores	Resultado esperado	Resultado obtenido	Código de error

En la Figura 4 podemos observar una prueba donde se pudo simular Objetos (Mocks), los cuales simulan el comportamiento de los objetos que van a ser probados al momento de realizar las pruebas donde las instancia a ser probada llamará a los Mock Objects realizando la ejecución del método a probar realizando la correspondiente test de prueba.

```

class testuserLdap extends TestCase {
    private $array;

    function testAutenticar() {
        $user = $this->getMockBuilder("Model")
            ->setMethods(array('User'))
            ->getMock();

        $user->expects($this->once())
            ->method('User')
            ->with($this->array)
            ->willReturn(3);

        $this->assertEquals(3, $user->User($this->array));
    }
}

```

Figura 4. Ejemplo de test con PHPUnit

En la Figura 5 se observa la implementación de las pruebas de funcionamiento del sistema donde nos basamos en el conjunto de herramientas de Selenium IDE [20]. el cual fue instalado sobre el navegador Mozilla Firefox, realizando las diferentes pruebas automatizadas identificando las funcionalidades del sitio desde una compra hasta la construcción de informes estadísticos de ventas, producción e inventario.

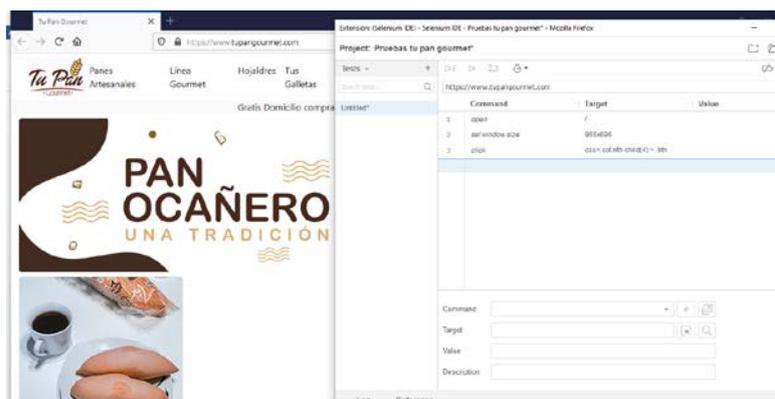


Figura 5. Test con Selenium IDE

Uno de los aspectos relevantes de la plataforma fue la implementación del algoritmo de inteligencia artificial [26] Clustering K-means el cual nos va a permitir encontrar grupos ocultos sobre un conjunto de datos no etiquetado específicamente en dos partes del aplicativo en la sección de comportamiento de compras de los clientes lo que va a permitir a los dueños del negocio poder agrupar a los clientes de acuerdo a aspectos de compra que nos permita direccionar aspectos publicitarios en la búsqueda de fidelización de clientes, de tal manera que dicha información sea de soporte para implementar un sistema de mensajería para alertar cuando hay pan caliente disponible de acuerdo al perfil de compra de los clientes y se pueda realizar pedidos a través de la aplicación, partiendo del principio que la empresa viene promocionando esa estrategia con panes congelados en sus 3 puntos calientes que tiene en la ciudad de Ocaña.

La programación del algoritmo se llevó a cabo utilizando la estrategia 7 pasos del Machine Learning [27] donde el paso 1 fue coleccionar datos, los cuales se utilizó las bases de datos de los 3 puntos de venta de la compañía alimenticia, ya que ellos cuentan con un sistema de facturación en cada punto y de allí se pueden sacar los datos para el ejercicio investigativo, una vez se tenía la información entramos al paso 2 preparación de los datos donde se identificaron las columnas o características de los clientes de interés para el modelo representados en la Tabla 5.

Tabla 5. Estructura de la tabla base de datos

Cliente	Fecha_compra	Hora	IdPro	Total	LugarCompra
Nombre1	Valores	Valores	Valores	Valores	Valores
NombreN	Valores	Valores	Valores	Valores	Valores

Con dichas variables se busca poder identificar los clientes a los cuales se les pueda alertar con mensajes al celular sobre la presencia de pan recién salido del horno para ser llevados a sus casas. En el paso tres seleccionamos el algoritmo Clustering K-means para segmentar por los clientes de acuerdo a sus preferencias de compras, hora, días de compra y el valor comprado con dichos datos se busca no ser invasivos con mensajes y solo enviar la alerta al interesado que arroje constantemente la ejecución del algoritmo.

El paso 4 sería entonces realizar pruebas de entrenamiento en base a los datos que sacamos del sistema de facturación existente en la panificadora tu pan gourmet, el quinto paso sería evaluar los resultados obtenidos en base a los set de datos de evaluación, si los resultados no son satisfactorios entramos al paso seis donde debemos configurar los parámetros que nos den los resultados esperados volviendo al paso 4 volver a seleccionar un valor de K para obtener el número de clusters en los datos, ejecutando el algoritmo para un rango de estimado de los valores K, analizar y comparar características de los grupos que van apareciendo, el paso siete sería trabajar con el algoritmo con datos que vamos recogiendo de la plataforma de E-commerce y comenzar a predecir o inferir resultados en tiempo real. En la Figura 6 observamos apartes de la codificación del algoritmo.

```

40 - Sublime Text (UNREGISTERED)
est Profesionales tab

1 <?php
2 $archivoLeer = "datos/datosclientes.txt";
3 if(!touch($archivoLeer)){
4     $archivoID = fopen($archivoLeer, "r");
5     while(!feof($archivoID)){
6         $linea = fgets($archivoID, 1024);
7         print "<p>" . $linea . "</p>";
8     }
9     fclose($archivoID);
10 }
11 $clienteTuplan = new KMeans(Space(2));
12 foreach ($puntos as $point)
13     $clienteTuplan->addPoint($point);
14 $grupos = $clienteTuplan->solve(3);
15 foreach ($grupos as $i => $grupo)
16     print("Grupo %d [x,y]: %s puntos\n", $i, $grupo[0], $grupo[1], count($grupo));

```

Figura 6. Programación del algoritmo K-means en php.

En la Figura 7 podemos ver algunas opciones del Menú administrador donde se tendrá la opción de poder ejecutar el algoritmo una vez se haga un procesamiento de la base de datos filtrando las características de los clientes a un archivo txt para mayor eficiencia del algoritmo.



Figura 7. Menú administrador

4. CONCLUSIONES

Con la investigación aplicada se logró dar apoyo a una empresa de la región de influencia de la Universidad Popular de Cesar Seccional Aguachica beneficiaria del gobierno Nacional del programa Fábricas de productividad del

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo aportándoles desde la academia en esta época de pandemia en incursionar en el E-commerce ya que una de las principales recomendaciones de los asesores del programa fue migrar al comercio a través de internet con nuevos enfoques de fidelización de clientes resaltando las diferentes líneas de producción de la compañía alimenticia.

Se logró en el desarrollo implementar el marco de trabajo de Pressman de ingeniería web, por ser un desarrollo 100% para internet y por ser una metodología ágil que permitió trabajar del lado de los interesados de la panificadora Tu Pan Gourmet de una manera iterativa tomando decisiones y pivotando rápidamente de acuerdo a las necesidades del cliente obteniendo un producto mínimo viable que pudiera ser sacado a producción lo más rápido posible.

En el desarrollo del aplicativo se implementó las herramientas de pruebas unitarias PHPunit y Selenium obteniendo resultados satisfactorios ya que se entregó un software documentado con aspectos de calidad para el buen funcionamiento del mismo, adicionalmente el sistema es adaptativo a diferentes dispositivos como celulares, Smartphone, Tablet y equipos de escritorio pensando en el confort del usuario mejorando su experiencia al momento de comprar y administrar la plataforma.

A nivel de seguridad se tuvo en cuenta tópicos de seguridad en la web de tal manera que se lograra minimizar el riesgo de incidencias de seguridad, resaltando que la seguridad debe ser constante ya que las vulnerabilidades de los lenguajes como PHP aparecen constantemente y se hace necesario monitorear para ir corrigiendo y mejorando los controles juntos a las bases de datos y demás tecnologías utilizadas en el Frontend y el Backend del sistema.

Se logró implementar el algoritmo de inteligencia artificial k-means, el cual se dejó en fase de prueba ya que aún la plataforma se encuentra en fase de implementación se espera que en pocos días ya esté funcionando a través de la url: <https://www.tupangourmet.com/> por la tanto no contamos con una base de datos real proveniente de internet, lo que se busco fue realizar un acercamiento basados en datos de un sistema POS de puntos de venta de aliados o franquicias de la compañía alimenticia.

REFERENCIAS

- [1] Joyanes, L. (2013). Industria 4.0 la cuarta revolución industrial. Omega.
- [2] Ramos, R. (2020). Perspectivas y retos de las técnicas de inteligencia artificial en el ámbito de las ciencias sociales y de la comunicación. *Disertaciones*, 13(1), 21-34.
- [3] Wang, Y., Kung, L. y Byrd, T. (2018). Big data analytics: Understanding its capabilities and potential benefits for healthcare organizations. *Technological Forecasting and Social Change*, 126, 3-13.
- [4] Puertas, P. (2019). IOT, el Internet de las Cosas. Logos.
- [5] Blokdyk, G. (2019). IBM Cloud Computing a Complete Guide. Prentice Hall.
- [6] Caballero, M. y Cilleros, D. (2019). Ciberseguridad y transformación digital: Cloud, identidad digital, blockchain, agile, inteligencia artificial. Anaya.
- [7] Tu pan gourmet. (2020). Quienes somos. Recuperado: https://www.tupangourmet.com/index_bro.
- [8] Fábricas de Productividad. (2020). Colombia Productiva. Recuperado: <https://www.colombiaproductiva.com/fabricasdeproductividad>.
- [9] Hernández, E. y Hernández, L. (2018). Manual del comercio electrónico. Kiler.
- [10] Hernández, R. y Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. McGraw Hill.
- [11] Callejas, M., Alarcón, A. y Álvarez, A. (2017). Modelos de calidad del software, un estado del arte, 13(1), 236-250.
- [12] Pressman, R. (2015). Software engineering. McGraw Hill.
- [13] Hill, C., Schilling, M. y Jones, G. (2019). Administración estratégica. Omega.
- [14] López, D. et al. (2019). El uso de las metodologías ágiles y su importancia para el desarrollo de software, *Killkana Técnica*, 3(1), 25-30.
- [15] Aguilar, R., Ramírez, R. y Aguilera, A. (2015). Tendencias en investigación y aplicaciones prácticas de la ingeniería de software: Una Selección del CONISOFT 2015. *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software*, 3(6), 213.
- [16] Escalante, A. (2019). Modelo para el desarrollo y evaluación de la usabilidad en sistemas de interacción tangible desde la perspectiva del diseño centrado en el usuario. *Entorno*, 67, 142-156.
- [17] Monar, J. et al. (2018). Técnicas de programación segura para mitigar vulnerabilidades en aplicaciones web. En Congreso de Ciencia y Tecnología. Lima, Perú.
- [18] Gutiérrez, A. y López, J. (2018). Desarrollo y programación en entornos web. Alfaomega.
- [19] PHPUnit. (2020). The PHP Testing Framework. Recuperado: <https://phpunit.de>.
- [20] Selenium. (2020). Tutorial. Recuperado: <https://www.tutorialselenium.com/2017/04/25/selenium-automatizacion-de-pruebas>.
- [21] Morales, A. y Pardo, C. (2016). Revisión sistemática de la integración de modelos de desarrollo de software dirigido por modelos y metodologías ágiles. *Revista Informador Técnico*, 80(1), 87-99.
- [22] ISO/IEC 27000. (2017). Gestión de Seguridad de la Información basado en la familia de normas técnicas. IEEE.
- [23] OWASP. (2020). Open Source Foundation for Application Security. Recuperado: <https://owasp.org/>.
- [24] Morales, E. y López, M. (2018). Sistemas de gestión de seguridad de la información para empresas KPO: Una aproximación. *Ventana Informática*, 37, 67-78.
- [25] Rizov, V. (2018). Information Sharing for Cyber Threats. *Information & Security*, 39(1), 45-50.
- [26] Boden, M. (2017). Inteligencia artificial. Logos.
- [27] Mitchell, T. (2017). Machine learning. McGraw Hill.

Análisis al funcionamiento de arquitecturas x86 y Advanced RISC Machine ARM en el procesamiento de archivos distribuidos de gran volumen

Rodolfo Sánchez García¹

Juan C. García-Ojeda²

¹Universidad Santo Tomás

²Universidad de Cartagena
Colombia

El presente trabajo tiene como finalidad comparar el funcionamiento de arquitecturas Advanced RISC Machine ARM con arquitecturas x86 en el procesamiento de archivos distribuidos de gran volumen, i.e., Big Data en función de tiempo de procesamiento, costo de infraestructura, consumo eléctrico, y espacio físico. En el montaje de las arquitecturas ARM se emplearon equipos Raspberri PI 3B y para la arquitectura x86 se usaron equipos HP Compaq dc5800 SFF. Para la gestión distribuida de los archivos se configuró la plataforma Apache Hadoop. El proceso de comparación de arquitectura consistió en pruebas de carga (i.e., pruebas iterativas de lectura de archivos de gran volumen), con las cuales se midieron tiempos de desempeño y consumo energético, las cuales brindaron información suficiente para establecer una comparación objetiva. El análisis de los resultados permitió evidenciar que, en términos de inversión, una arquitectura ARM es la mejor opción al ser un tercio menos costosa respecto a la x86. Sin embargo, la arquitectura x86, es más eficiente computacionalmente con respecto a la arquitectura ARM.

1. INTRODUCCIÓN

Es importante recordar que las metodologías y tecnologías para la inteligencia de negocio tienen como objetivo reunir, depurar y transformar datos, para su análisis y obtención de conocimiento, que permita dar soporte a la toma de decisiones en empresas y corporaciones. Sin embargo, en la actualidad, se enfrentan a una ineludible realidad.

Un estudio de noviembre del 2018 estimaba que la cantidad de datos a nivel mundial, creados, capturados o replicados en dispositivos finales de usuario (datos generados por fuentes tales como los equipos de telefonía móvil, dispositivos GPS y multimedia: audio, video, etc., y sensores múltiples y en centros de datos (tradicionales y de computación en la nube), se incrementará de 33 ZB (1 Zettabyte = 10^{21} Bytes) en 2018 a 175 ZB en 2025 [1].

Por lo tanto, si se ofrece servicios tecnológicos o de consultoría en el área de inteligencia de negocio, es importante reconocer las prestaciones tecnológicas de diferentes infraestructuras de cómputo para poder procesar grandes volúmenes de datos. Por lo general, el desempeño de la infraestructura de cómputo (por ejemplo, tradicional o basado en la nube) se mide respecto al tiempo de cómputo o procesamiento de los datos de entrada. Por esta razón, la necesidad fundamental del negocio y el riesgo expuesto ante las decisiones tomadas dependerá si el tiempo de procesamiento es el necesario.

En tal sentido, para reducir el tiempo de procesamiento, se suele aumentar la capacidad de la infraestructura de cómputo, bien sea incrementando el número de servidores y dispositivos del centro de cómputo (empero de aumentar el impacto de la huella de carbono, o sea, del consumo eléctrico) o adoptando tecnologías que permita ejecutar mayor cantidad de instrucciones por unidad de tiempo [2].

Por ello en el presente trabajo se muestran los resultados analíticos de evaluar el rendimiento computacional-energético de arquitecturas ARM y x86 en el procesamiento de archivos de gran volumen, gestionados por Apache Hadoop, y observen las indicaciones de la U.S. Environmental Protection Agency EPA y la European Environment Agency EEA respecto a la reducción de la huella de carbono.

2. MÉTODO

El método de este trabajo fue estructurado en cinco fases: 1) infraestructura de las arquitecturas, 2) configuración lógica de la arquitectura, 3) selección de archivos de entrada, 4) documentar pruebas de carga, y 5) resumen de los hallazgos más significativos.

2.1 Infraestructura hardware para cada arquitectura

- *Infraestructura de la arquitectura ARM.* La primera infraestructura se basa en un clúster de dispositivos de arquitectura ARM. Para este caso, se emplearon dispositivos conocidos comercialmente como Raspberry PI 3B. Las características de estos dispositivos de hardware pueden verse en detalle en la Tabla 1. Para el caso de este proyecto, el clúster está conformado por tres dispositivos Raspberry PI y la conectividad se logra por medio de conexión inalámbrica.
- *Infraestructura de arquitectura x86-64.* La segunda infraestructura se basa en un clúster de dispositivos con arquitectura x86-64 (Tabla 2).

Tabla 1. Especificaciones de hardware Raspberry PI 3B

Característica	Descripción
Sistema de Chip	Broadcom BCM2837
CPU	4 cores ARM Cortex-A53 (ARMv8-A) 64-bit @1.2 GHz
GPU	Broadcom VideoCore IV - 400MHz
RAM	1GB LPDDR2 (900 MHz)
Conectividad	10/100 Ethernet, 2.4 GHz 802.11n inalámbrica
Bluetooth	Bluetooth 4.0 Classic, Bluetooth de bajo consumo.
Storage	MicroSD
GPIO	40-pines
Puertos	HDMI, 3.5mm conector analógico audio-video, 4 puertos USB 2.0, Ethernet
Camera Serial Interface (CSI)	Display Serial Interface (DSI)
Alimentación	5 VDC a 2A

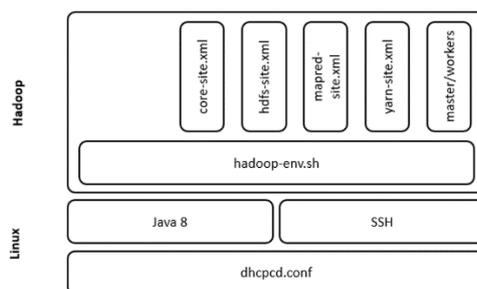
Tabla 2. Especificaciones de hardware equipos desktop

Característica	Descripción
Fabricante	Hewlett Packard – HP Compaq dc5800 SFF
Sistema de Chip	Intel
CPU	4 cores Intel Core 2 Duo 32-bit @ 2.4 GHz
GPU	AMD Graphics
RAM	2 GB
Conectividad	10/100 Ethernet
Storage	250 GB HDD
GPIO	40-pines
Puertos	3.5mm conector analógico entrada y salida de audio, salida VGA, puerto serial teclado y mouse, 6 puertos USB 2.0, Ethernet
Alimentación	110-220 VAC a 5A a 50-60 Hz

2.2 Estructura lógica de cada arquitectura

Para la construcción de la estructura lógica de cada arquitectura, se tuvieron en cuenta tres dispositivos por clúster de cada una de ellas. Para el caso de la arquitectura ARM, se realizará el montaje físico y la conectividad será inalámbrica para facilidad de movilidad de los equipos. Por otra parte, para la arquitectura x86-64, el montaje será por medio de virtualización y cada equipo estará conectado por medio de la opción NAT.

Se revisó literatura de configuración en sitios web como Linode, Cloudera, DigitalOcean, entre otros, que dentro del soporte que ofrecen a los servicios de alquiler de espacio en la nube, también cuentan con instructivos para la implementación y configuración de Apache Hadoop [3], según la versión, el alcance y la aplicación que se desee implementar. Estos permitieron consolidar un procedimiento de configuración exitoso para cada arquitectura. En la Figura 1 se muestra un diagrama en bloques que permite entender rápidamente el proceso de implementación del clúster de cada arquitectura.

**Figura 1.** Diagrama en bloques de la configuración lógica del cluster para cada arquitectura

Cada clúster corre en una distribución de Linux, según cada arquitectura. Para ARM se empleó Raspbian-Lite, mientras que para x86 se empleó Ubuntu 16.0.4 LTS. La capa más baja está representada por la configuración de conectividad, que permitía la comunicación entre nodos del clúster por medio de protocolo IP. Esta era manejada por el archivo dhcpcd.conf y contenía información sobre direccionamiento IP y configuración lógica de la red.

En una capa superior, se debía configurar Java 8, quien es el encargado del procesamiento distribuido del clúster [4]. A la par, aparece el bloque SSH quien permite la comunicación y gestión remota de las actividades que se reparten a lo largo del clúster. En el contexto de ejecución de Hadoop, toda la aplicación se basa en la configuración del archivo de entorno llamado hadoop-env.sh. Aquí se definen las rutas en las que los recursos disponibles para la ejecución de las aplicaciones de MapReduce, los nodos del sistema llamados DataNode y NameNode, la carpeta de archivos de Java y la gestión del almacenamiento de los archivos del clúster [5].

Para la definición de las tareas más específicas del sistema del clúster, se emplean archivos de extensión XML. Estos corresponden a:

- *core-site.xml*: Se encarga de gestionar los *daemon* (servicios ejecutados en segundo plano). También contiene información sobre la ubicación del sistema de archivos.
- *hdfs-site.xml*: Contiene información de configuración de los *daemon* para el sistema de archivos distribuidos de Hadoop, como por ejemplo ubicación (de los DataNode y NameNode) y la replicación del sistema de archivos.
- *mapred-site.xml*: Contiene información de los *daemon* para las actividades de MapReduce, la ubicación de los registros de las tareas y la ubicación del sistema de archivos de HDFS.
- *yarn-site.xml*: Contiene información sobre los recursos de CPU y memoria disponible para todos los nodos, aplicaciones y colas de ejecución.

Un último bloque contiene los nombres de los nodos esclavos o *workers* disponibles en el clúster.

2.3 Selección de archivos de entrada

Los clústeres configurados previamente tienen incluido en su sistema de archivos de Hadoop, un algoritmo implementado en Java que permite hacer conteo de palabras de archivos de texto plano. Un repositorio de texto plano muy usado para aplicaciones de NLP (del inglés *Natural Language Processing*, Procesamiento de lenguaje natural) es conocido como el proyecto Gutenberg. Este repositorio cuenta con una biblioteca de más de 60.000 libros de acceso gratuito, principalmente en inglés y con variedad de idiomas como portugués, alemán y francés.

Dentro de este repositorio, se han agrupado diferentes archivos de texto en carpetas que sumen tamaños de 10, 50, 100, 150 y 200 MB, los cuales serán analizados por cada uno de los clústeres. Cada grupo de archivos poseen 32, 122, 231, 335 y 451 archivos respectivamente.

2.4 Documentar pruebas de carga

Para validar el tiempo de procesamiento de cada clúster, cada grupo de archivos será analizado 10 veces por cada clúster. Esto permitirá determinar un valor promedio y, por ende, un consumo energético promedio. Al final, se analizará la duración y consumo por tamaño de archivos al que cada clúster debe realizar el conteo de palabras.

2.5 Resumen de los hallazgos más significativos

Como resumen, se presentan en breve los hallazgos más significativos obtenidos en las pruebas para cada clúster:

- Las pruebas realizadas en la arquitectura ARM, los tiempos promedios presentan una desviación estándar por encima de los 192 segundos, para los paquetes de texto por encima de 100 MB.
- La arquitectura x86 muestra un comportamiento en los tiempos promedios con desviaciones estándar por debajo de los 5,5 segundos.
- El consumo energético para ambas arquitecturas varía entre un 50 y 80% con respecto a las mediciones obtenidas entre ellos.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Figura 2, se muestra el tiempo (en segundos) de análisis de los archivos mencionados, durante los 10 experimentos para la arquitectura x86-64. Para este caso, la arquitectura x86-64 muestra un comportamiento uniforme para los volúmenes de 50 MB y 150 MB, cuyas desviaciones estándares son las más bajas (3,4 segundos y 5,5 segundos). Mientras que el volumen de 200 MB presenta la desviación estándar mayor de todos los experimentos (11,8 segundos).

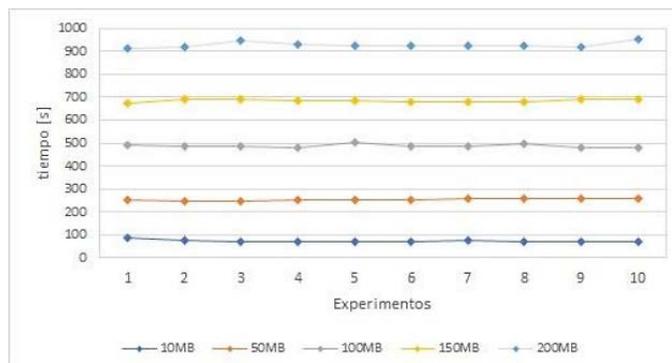


Figura 2. Tiempos de experimentos para arquitectura x86

En la Figura 3, se muestra el tiempo (en segundos) de análisis de los archivos mencionados, durante los 10 experimentos para la arquitectura ARM. Mientras que para la arquitectura ARM, la gráfica muestra un comportamiento medianamente uniforme para los volúmenes de 10 MB y 50 MB, cuyas desviaciones estándares son las más bajas (26,5 segundos y 82,4 segundos). Para los otros casos se tienen desviaciones estándares altas y en aumento (192,6 segundos, 226 segundos y 541 segundos, respectivamente).

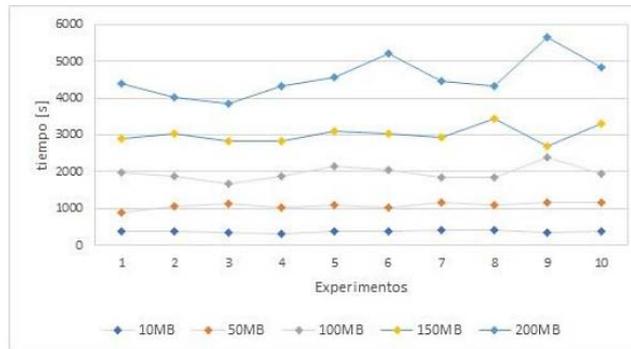


Figura 3. Tiempos de experimentos para arquitectura ARM

En la Figura 4, se muestra el consumo promedio de energía (en kWh) para el análisis de los archivos mencionados, para ambas arquitecturas, según el volumen de archivos a analizar.

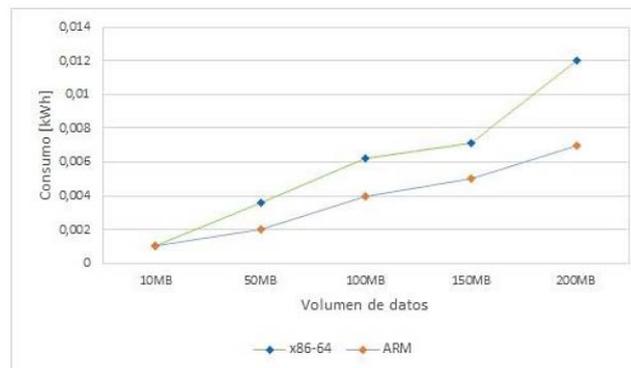


Figura 4. Comparación de consumo promedio de energía por experimento en ambas arquitecturas.

4. CONCLUSIONES

Inicialmente el objetivo del trabajo proponía determinar en que el uso de clúster de ordenadores de placa reducida de arquitectura ARM, permitiría un menor consumo de energía eléctrica y un menor tiempo de procesamiento de grandes volúmenes de información, en comparación con arquitectura computacional x86, causando así una menor inversión de infraestructura tecnológica y una menor inversión en costos de operación.

En el análisis y comparación de las arquitecturas implementadas, esta hipótesis no se cumple debido a que el clúster de arquitectura ARM luego de las pruebas realizadas consume más energía y analiza los archivos en un mayor tiempo en comparación con la arquitectura x86-64. Sin embargo, se debe tener en cuenta que a pesar de que el número de dispositivos por arquitectura era el mismo, la capacidad del clúster era mayor para la arquitectura x86.

Además, como se mencionó anteriormente el costo de infraestructura sí es menor para la arquitectura ARM, hasta tal punto de poder ampliar la capacidad del clúster con un presupuesto inferior de la arquitectura x86-64. El costo de la infraestructura ARM con respecto a la x86 es de un 20%. Ampliando el número de dispositivos ARM podría obtenerse una infraestructura con mayor densidad de cómputo.

A continuación, se resumen los inconvenientes presentados durante el desarrollo del trabajo de investigación:

- Durante la ejecución de las pruebas, dos nodos del clúster ARM sufrieron fallos eléctricos y debieron ser reemplazados. Se presume que el daño tiene que ver con tiempo extendido de trabajo, sobrecarga eléctrica y aumento de temperatura del hardware. Debe considerarse una temperatura de operación por debajo de los 60 °C.
- Las pruebas en el clúster ARM tuvieron que ser validadas debido a fallos de ejecución en el software. Esto es por la poca capacidad y a la configuración de los parámetros en el administrador de recursos de memoria.

Como lecciones aprendidas luego del desarrollo del trabajo, se pueden mencionar las siguientes:

- No solamente Hadoop permite la administración de este tipo de estructuras, sino que también hay otros entornos que pueden aprovechar mejor las prestaciones de hardware de estos sistemas como Spark, Hive, Pig, entre otros. Se implementó Hadoop por ser el más básico de todos.
- Basado en la experiencia de trabajo en empresas de tecnologías de la información, cada cierto periodo se da de baja numerosos equipos de cómputo como chatarra por desactualización que pudiesen ser aprovechados en la implementación de clústeres para tareas específicas dentro del importante campo de la analítica de datos y el manejo de grandes volúmenes de datos.
- Se considera como una buena oportunidad ampliar la cantidad de los nodos del clúster de arquitectura ARM y validar el rendimiento en tiempo de los dos sistemas. Además, una de las ventajas notorias en términos de eficiencia, está dada en la alta densidad de procesamiento de la arquitectura ARM en cuanto al tamaño que puede ocupar este tipo de arreglos de infraestructura.

Como trabajo futuro se propone desarrollar un trabajo de análisis de benchmarking de diversos *startups* que construyen clústeres a partir de computadores de placa reducida. Estos *startups* ofrecen hardware a partir de la construcción de estos supercomputadores bajo la premisa de alta densidad (mayor procesamiento, en espacio reducido), bajo costo, bajo consumo eléctrico y bajo requerimiento de refrigeración. Incluso, en ciertos casos al ser comparados con el costo que implica adquirir un servicio *cloud* en cuanto a accesos, transacciones, alquiler mensual, entre otros, resulta mucho más económico poseer la infraestructura de este tipo de clúster en sitio.

Sin embargo, la complejidad en la construcción, conectividad y recursos disponibles hace que éstos sean de difícil mantenimiento, están sujetos a fallos de hardware por la cantidad de partes del sistema y su costo sea únicamente apropiado para grandes compañías.

Seguidamente, vale la pena resaltar que, en Colombia para el año 2017, las pequeñas y medianas empresas representaban el 90% del sector productivo nacional y eran responsables del 35% del producto interno bruto y generaban el 80% del empleo en el país [6]. La propuesta de construir con un rubro máximo de 1,500 dólares para la implementación de un clúster compuesto por 10 dispositivos de arquitectura ARM, podría permitir el considerar un uso en actividades de procesamiento de archivos distribuidos, como un apoyo de infraestructura tecnológica para este tipo de economías de baja escala en el país.

REFERENCIAS

- [1] IDC. (2018). The digitalization of the World from Edge to Core. International Data Corporation. Recuperado: <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>.
- [2] Dumbill, E. (2012). Planning for Big Data. O'Reilly Media.
- [3] Apache Hadoop. (2019). Hadoop – Apache Hadoop 3.2.1. Recuperado: <https://hadoop.apache.org/docs/stable/>.
- [4] White, T. (2015). Hadoop: The definitive guide. O'Reilly Media.
- [5] Miner, D. (2016). Hadoop: What you need to know. O'Reilly Media.
- [6] Revista Dinero. (2017). Los retos que enfrentan las mipymes en Colombia. Recuperado: <https://www.dinero.com/edicion-impres/pymes/articulo/los-retos-que-enfrentan-las-mipymes-en-colombia/241586>.

Análisis de los requerimientos en habilidades de la industria del software para gerentes de proyectos en entornos ágiles

Sebastián López
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Colombia

Con la creciente popularidad de los métodos ágiles, muchas organizaciones de software se están alejando de métodos tradicionales para adoptar metodologías de desarrollo ágil, esto conlleva que el gerente de proyectos de software evolucione en habilidades tanto técnicas como blandas, siendo estas últimas las de más alto impacto en el trabajo dinámico en entornos ágiles. Las habilidades blandas, también conocidas como competencias sociales, son universalmente reconocidas como fundamentales para la gestión exitosa de proyectos. El objetivo de este estudio es analizar los diferentes requerimientos en habilidades de la industria del software bajo el rol del gerente de proyectos que se desenvuelve en entornos ágiles. Dentro de la revisión de literatura se abarcaron las guías o marcos de trabajo en gestión de proyectos reconocidas a nivel global, libros, artículos de investigación, reportes de la industria de reclutamiento y ofertas laborales, a fin de obtener las habilidades más representativas que un gerente de proyectos debe poseer al involucrarse en el desarrollo de Software Ágil. Finalmente se presenta una caracterización de las habilidades blandas enmarcadas en tres escalas partiendo de su nivel inferior con las deseables, posteriormente las importantes y en la escala superior los mandatorios. Se destacan en el nivel superior la comunicación y el liderazgo, las cuales sobresalen por las demás debido a su número de hallazgos en diferentes fuentes.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión ágil de proyectos es un marco conceptual en ingeniería de software, donde el software es construido dentro de un período de tiempo relativamente corto y tiene varias iteraciones que producen una liberación estable de software [1]. El Ciclo de Vida de Desarrollo de Software Ágil (CVDSA) se usa ampliamente en la industria del desarrollo de software; en consecuencia, ha sido el foco creciente de investigación. La decisión de las organizaciones y equipos de proyecto de adoptar una metodología Ágil es de particular interés para los investigadores, y los estudios en esta área han propuesto técnicas y herramientas para apoyar la toma de decisiones en torno a la adopción del Agilismo [2].

Los proyectos de desarrollo de software (todo tipo de tamaño: grandes mediados y pequeños) para los años comprendidos entre 2011 y 2015, tuvieron una tasa de éxito del 29% bajo metodologías ágiles y un 11% de éxito en metodológicas en cascada [3]. El éxito de los proyectos tiene la base en aplicar las habilidades blandas, pues resulta más retador cuando se trabaja sobre proyectos de desarrollo de software ágil. Aquí se requieren habilidades blandas más desarrolladas y una comprensión de cómo aplicar esas habilidades en un entorno más maleable y centrado en las personas [4]. Según Gulla [5], el 54% de los fallos en los proyectos TI pueden atribuirse a la gestión de este, mientras que solo un 3% se atribuye a los cambios técnicos; el éxito de un proyecto depende del gerente del proyecto en función a sus competencias [6]. La labor de un gerente de proyectos software es variada y compleja, por lo que necesita contar con ciertas habilidades duras y blandas para desempeñar los deberes y las actividades inherentes a su cargo [7].

Hay información limitada sobre la comprensión del gerente del proyecto en cuanto al Desarrollo de Proyectos de Software Ágil (DPSA), el objetivo de este estudio es analizar ¿Cuáles son las bases de habilidades blandas, y/o atributos personales y comportamiento requeridos? Por un gerente de proyecto en DPSA. Por lo tanto, este hallazgo espera hacer una contribución significativa al gerente del proyecto para incrementar el éxito de DPSA. Para investigar esto, se realizó una revisión de literatura abarcando 5 elementos de fuente de información, para identificar las habilidades blandas en gerentes de proyectos para Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), involucrando guías de proyectos, artículos de investigación, libros, reportes de industria de reclutamiento y ofertas laborales y así identificar los datos cualitativos y representarlos de forma cuantitativa para obtener las habilidades más representativas requeridas en los gerentes de proyecto en DPSA.

La motivación para este análisis es producir una base de las habilidades blandas que un gerente de proyectos para DPSA debería poseer para incrementar el éxito de su gestión. Se parte de un marco referencial en la sección 2. En la sección 3, se mencionan los conceptos como la metodología usada para poder recabar los datos. El análisis de los datos como el resultado de estos se tratan en la sección 4. La sección 5 presenta una conclusión y una parte para trabajos futuros.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Qué es una habilidad

Se define una habilidad como una habilidad para hacer algo bien; pericia [8], en su sentido más amplio. Sin embargo, para comprender lo que esto significa, se debe analizar la investigación relacionada sobre lo que caracteriza a una habilidad y cómo se adquieren. La adquisición de una habilidad cognitiva puede describirse en dos etapas principales: una etapa de conocimiento declarativo y una etapa de conocimiento procesal [9]. Estas etapas están íntimamente

conectadas con lo que Argyris [10] llama aprendizaje de bucle simple y doble. Es posible aprender a repetir nueva información sin integrarla en un nivel más profundo. Con un aprendizaje tan superficial, no se puede aplicar el conocimiento adquirido en nuevas situaciones, y no se puede traducir el nuevo conocimiento a casos similares [10]. Una habilidad se define como la habilidad aprendida para obtener resultados predeterminados con el máximo certeza, a menudo con el mínimo gasto de tiempo o energía o ambos.

2.2 Habilidades blandas

El término habilidades blandas (*soft skills*) se presume que tiene origen en los ejércitos de Estados Unidos en 1972. Se quería en ese tiempo identificar aquellas habilidades adicionales que se necesitaban para operar maquinas. Las *Soft Skills* se definieron inicialmente como aquellas habilidades que se pueden aplicar en distintos contextos de trabajo [11]. Por su parte, Kechagias [12] definió las habilidades blandas como habilidades intra e interpersonales (socioemocionales), esenciales para el desarrollo personal, la participación social y el éxito en el lugar de trabajo. La habilidad blanda se usa con mayor frecuencia para describir todos los aspectos parciales, como la calificación de los empleados de un proyecto para manejar las relaciones humanas, el comportamiento en conflictos, motivación para trabajar, estilo de liderazgo o trabajo en equipo [13].

2.3 Habilidades blandas en el desarrollo de software

La producción de cualquier pieza de software implica un elemento humano, que requiere actividades tales como la resolución de problemas, el pensamiento analítico, la comunicación y el razonamiento cognitivo [14]. Además, el desarrollo de software comprende diferentes actividades (análisis de sistemas, diseño, codificación y pruebas) que requieren no solo habilidades diferentes, sino también diferentes tipos de personalidad. Lógicamente son actividades diferentes que se acoplan para lograr el objetivo de construcción y operación de software. La interpretación a nivel micro de estas actividades, exige un conjunto de habilidades de las personas involucradas para llevar a cabo la actividad de manera efectiva [15].

3. MÉTODO

Se utilizó una revisión sistemática (artículos científicos, revistas indexadas, libros de metodología de la investigación de editoriales internacionales reconocidas, portal de empleo) como técnica exploratoria y analítica para la recolección de información relevante sobre los procedimientos existentes, actualizados y efectivos para realizar una revisión de la literatura.

3.1 Identificación de habilidades blandas

Las habilidades blandas son atributos importantes de un gerente de proyecto efectivo. El poder identificar las habilidades blandas requeridas por la industria que es sin duda un factor relevante, donde posicionan estas como factor diferenciador en la selección de personal [16]. Se necesita una variedad de habilidades blandas y duras para resolver la gran cantidad de problemas relacionados con el desarrollo de software [17]. El análisis sistemático de la literatura sirve para presentar nuevas perspectivas sobre las habilidades blandas del gerente de proyecto en el DPSA, encontrándose numerosas habilidades blandas que pueden impactar positivamente en la efectividad de un gerente de proyecto.

Dentro de la recopilación de datos se enfocó en cinco segmentos específicos para recopilar aquellas habilidades blandas con una relación lo más directamente posible con el rol de gerente de proyectos en el entorno de las TIC:

- Guías de proyectos, que posean una extensión o capítulo de habilidades requeridas en los gerentes de proyecto.
- Libros, cuyo contenido posea una relación directa con gerentes de proyectos en entornos ágiles.
- Artículos de investigación, se seleccionaron aquellos que tiene una relación directa con las habilidades blandas bajo el rol de gerencia de proyectos.
- Reportes de empresas de reclutamiento, aquí se identifican habilidades que están solicitando el mercado sin una distinción de rol determinado.
- Ofertas laborales relacionadas con gerencia de proyectos en TIC, destacando las habilidades blandas requeridas.

3.2 Análisis de revisión de literatura

Teniendo en cuenta el marco investigativo definido en el documento, es necesario proporcionar una revisión de literatura sobre la identificación de las habilidades blandas con un enfoque directo hacia de los gerentes de proyectos. Para ello se establecieron las fuentes documentales y las bases de datos online a ser consultadas y las palabras claves, esta relación puede detallarse en la Tabla 1.

Tabla 1. Fuentes documentales

Fuentes documentales	Facilitadores de búsqueda	Palabras claves
Guías de proyectos para gerentes de proyectos	Google Scholar	Project Manager
Libros	Microsoft Academy	Soft Skills
Artículos de investigación	ResearchGate	IT
Reportes de industria de reclutamiento	ScienceDirect	Agile
Ofertas laborales	IEEE Xplore	Competences
	LinkedIn	

Como se mencionó anteriormente, esta investigación tiene como objetivo identificar las habilidades blandas del gerente de proyectos en entornos ágiles. Con base en las pautas provistas en [18], los pasos dados para este estudio fueron: 1) determinar las fuentes de información, 2) elementos relacionadores para su búsqueda, 3) búsqueda de la literatura relevante, 4) selección de los estudios más relevantes y extracción de datos, y 5) clasificación de datos y síntesis. En la Figura 1 ilustra el marco conceptual utilizado para esta investigación.

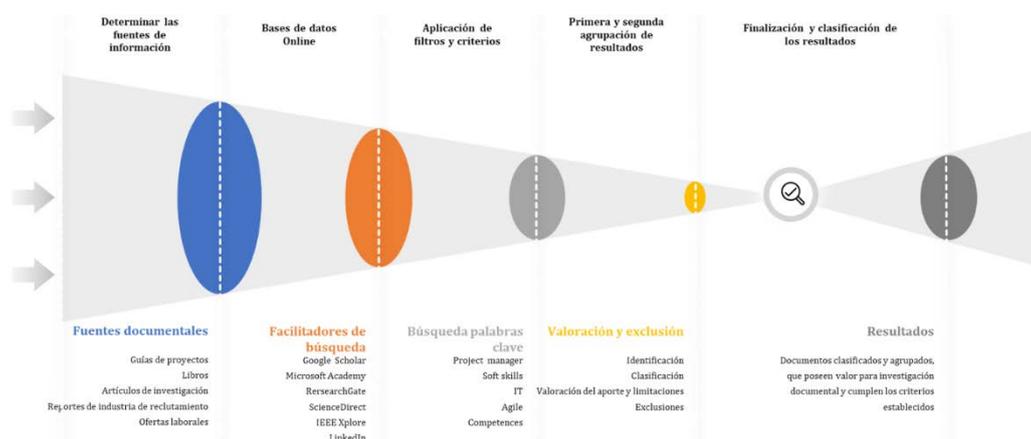


Figura 1. Marco conceptual de revisión de literatura en fuentes primarias y secundarias

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para analizar las habilidades blandas identificadas para el gerente de proyectos, se utilizaron las cinco categorías de fuentes documentales descritas en el análisis de revisión de la literatura (Tabla 1), donde a cada una de estas categorías se le aplicaron unos criterios de valoración.

4.1 Guías de proyectos

En las guías de proyecto a nivel mundial se hallaron institutos y asociaciones de gerencia de proyectos, para lo cual se optó de incluir únicamente aquellos institutos u organizaciones que posean una extensión, capítulo o definición específica sobre las habilidades blandas o competencias que debe poseer el gerente de proyectos. Dentro de la búsqueda se hallaron 10 organizaciones reconocidas a nivel mundial que determinan lineamientos para la gestión de proyectos, de estas 10, donde solo se tomaron tres que poseen una extensión o capítulo de habilidades blandas para los gerentes de proyectos o tienen definido dichas competencias de forma explícita.

Los siete institutos restantes, aunque solo tres de ellos tienen una guía de proyectos, ninguno posee un marco de competencias definido o establecen las habilidades blandas que debe poseer un gerente de proyectos. La relación de los institutos con el número de habilidades blandas halladas se pueden ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Guías de proyectos

Institución	País	Guía de proyectos	Marco de competencias	Hallazgos en habilidades blandas
PMI [19]	EE.UU.	●	Project Management Competency Development Framework [20]	6
APM [21]	Reino Unido	●	APM Body of Knowledge [22]	3
IPMA [23]	Países Bajos	●	Individual Competence Baseline for Project, Programme & Portfolio Management [24]	18
FAI [25]	EE.UU.	●	○	-
ISO [26]	Suiza	●	○	-
PMAJ [27]	Japón	●	○	-
AXELOS [28]	Reino Unido	●	○	-
AAPM [29]	EE.UU.	○	○	-
AIPM [30]	Australia	○	○	-
HKIPM [31]	Hong Kong - China	○	○	-

4.2 Libros

Otra fuente de literatura que se basó la revisión fueron los libros, se tuvo en cuenta una relación directa con el rol de gerente de proyectos y habilidades blandas. De ellos se extrajo las habilidades que poseen una mención y definición, como aplicabilidad en la gestión de proyectos. En la Tabla 3, se presentan los criterios tenidos en cuenta, siendo estos no excluyentes en la clasificación y síntesis.

Tabla 3. Libros

Título	Año	Marco de competencias	Enfoque TIC	Ciclo de vida	Hallazgos en habilidades blandas
Emotional Intelligence for Project Managers [32]	2013	●	○	○	10
Agile for Project Managers [33]	2015	●	●	●	7
The Complete Project Manager: Integrating People, Organizational, and Technical Skills [34]	2019	●	○	○	5

4.3 Artículos de investigación

Para la inclusión de los artículos de investigación se establecieron los siguientes criterios de contenido no excluyentes, entre estos tenemos: que tuviese un enfoque a la gerencia de proyectos, que pueda poseer el rol de gerentes de proyectos, un enfoque a TIC, que pueda tener menciona al ciclo de vida de desarrollo de software y de forma explícita se determine habilidades blandas. La relación de dichos criterios y su cronología se especifican en la Tabla 4.

Tabla 4. Artículos de investigación

Referencia	Año	Enfoque a gerencia de proyectos	Enfoque rol de gerente de proyectos	Enfoque a TIC	Ciclo de vida	Habilidades blandas definidas	Hallazgos en habilidades blandas
[35]	2014	○	○	●	●	●	8
[36]	2015	●	●	●	○	●	22
[37]	2015	●	●	●	●	●	11
[38]	2015	●	●	●	○	●	5
[39]	2015	●	●	○	○	●	6
[40]	2016	●	●	●	○	●	7
[41]	2016	●	●	●	●	●	10
[42]	2016	●	●	○	○	●	5
[43]	2016	○	○	●	●	●	11
[44]	2016	●	●	●	○	●	4
[45]	2016	●	●	○	○	●	7
[46]	2017	●	●	○	○	●	1
[47]	2017	●	●	●	○	●	15
[48]	2018	●	●	●	○	●	2
[49]	2018	○	○	●	●	●	3
[50]	2018	●	●	○	○	●	4
[51]	2019	○	○	●	●	●	9
[52]	2019	●	●	●	○	●	2
[53]	2020	●	●	○	○	●	10

4.4 Reportes de empresas de reclutamiento

En contraste con los artículos de investigación recopilados como los libros, se estableció una fuente de literatura la cual son los reportes de la industria de las empresas de reclutamiento más relevantes del mercado. Dentro de estos reportes se evidencian las habilidades blandas más solicitadas por el mercado laboral de diferentes industrias o sectores del mercado.

Cabe resaltar que dentro de los reportes mencionados no se establecen relaciones directas con el rol de gerente de proyectos y el sector de TIC, pero con ello se quiere establecer una relación entre las habilidades requeridas para la gestión de desarrollo de software ágil y la necesidad del mercado laboral. En la Tabla 5 se muestran las empresas de reclutamiento y el país donde se utilizaron las fuentes de datos para la elaboración del reporte.

Tabla 5. Reportes de empresas de reclutamiento

Institución	Año	País	Habilidades blandas	Hallazgos en habilidades blandas
Society for Human Resource Management [54]	2016	EE.UU.	●	14
ManpowerGroup [55]	2016	Europa occidental	●	17
Joblift [56]	2017	Reino Unido, Alemania, Francia y Holanda	●	20
ManPower [57]	2018	EE.UU.	●	6
LinkedIn Talent Solutios [58]	2019	Global	●	5

4.5 Ofertas laborales

Una última fuente de revisión literaria estuvo relacionada con la demanda de ofertas laborales por parte del sector de la industria TIC. Para la identificación de las ofertas laborales en la red social LinkedIn en su sección de portal de empleo, se utilizaron los siguientes criterios:

- Oferta dirigida a gerentes de proyectos TIC
- Se requiera conocimientos en metodologías ágiles
- Especificación de las habilidades blandas requeridas para dicho perfil
- Las ofertas pueden ser en cualquier parte del mundo

En la Tabla 6, se detalla el resumen de los hallazgos en Habilidades Blandas.

Tabla 6. Ofertas laborales relacionadas con habilidades blandas

Portal de empleo	Sitio Web	Año	Hallazgos en habilidades blandas
LinkedIn	www.linkedin.com	2020	63

4.6 Identificación y caracterización de las habilidades blandas

En el paso final del proceso correspondiente a la clasificación y síntesis, se lograron hallar 326 habilidades de forma general, obtenidas de 44 fuentes (Tabla 7), en una primera revisión de las habilidades blandas registradas en la hoja de cálculo, se evidenció que muchas de ellas, apareció en más de una fuente de datos con el mismo nombre o un nombre ligeramente diferente, el paso posterior fue identificar las coincidencias dentro del conjunto de las 326 habilidades y cuantificar por cada habilidad su número de coincidencias, en total, se obtuvieron 71 habilidades blandas bajo las fuentes de información documental.

Tabla 7. Origen de datos y cuantificación final

Fuente	Fuentes	Hallazgos en habilidades blandas
Guías de proyectos	3	27
Libros	3	22
Artículos de investigación	19	152
Reportes de industria de reclutamiento	5	62
Ofertas laborales	56	63
Total	44	326

Para lograr obtener una caracterización más concreta de las habilidades, se aplicó un procedimiento basado en la agregación y escalas, teniendo como punto de referencia las frecuencias de cada habilidad. En la Figura 2 se presenta el flujo del procedimiento aplicado a los resultados obtenidos.

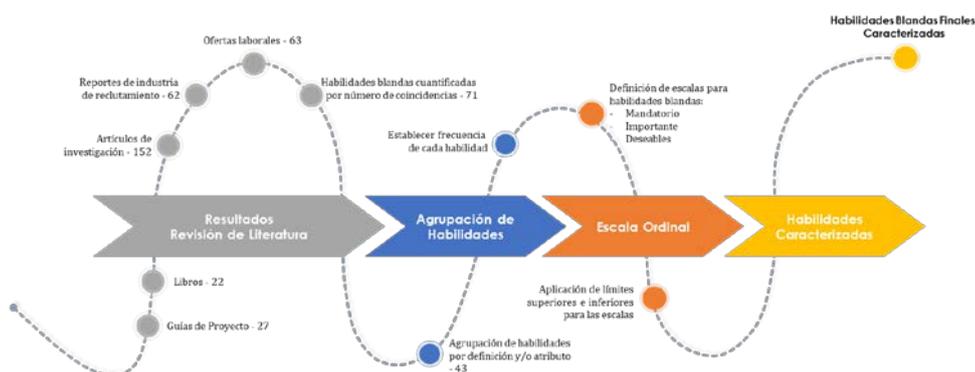


Figura 2. Procedimiento de identificación y caracterización de las habilidades blandas

Dentro de las 71 habilidades existen habilidades correspondientes o de similitud, ya sea por ser sinónimo, derivación de una habilidad más general, o comparten los mismos atributos, se realiza una agrupación basándose en definición o/y atributos relacionales para las habilidades. Esta homogenización en la terminología fue necesaria para poder obtener una conceptualización en común y determinar las habilidades más relevantes. Una vez finalizada la agrupación de las habilidades blandas por su homogenización en conceptos, se obtiene un total de 43 habilidades resultantes. En la Tabla 8, se presentan las habilidades blandas obtenidas en la agrupación con su frecuencia respectiva.

Como paso siguiente se establece una escala de tipo ordinal, la cual estará dada por 3 categorías para clasificar las habilidades blandas según su frecuencia, estas escalas son: mandatorios, importantes y deseables. Se propuso establecer unos intervalos sobre cada una de las escalas, a fin de hacer más simple la caracterización de las habilidades

que se desean evaluar. Partiendo de tres elementos de las escalas, se aplican intervalos superiores e inferiores referenciándose en la frecuencia y fijando los puntos de dichos intervalos por medio de la media y mediana. En la Tabla 9 se presentan los intervalos como los valores de frecuencia para lograr determinar así una escala.

Tabla 8. Habilidades blandas agrupadas y su frecuencia.

Habilidad blanda	Frecuencia	Habilidad blanda	Frecuencia
Comunicación	39	Autónomo	3
Liderazgo	33	Competencias digitales	3
Planeación y Control	22	Habilidades empresariales	3
Negociación	20	Apasionado	3
Motivación	17	Iniciativa	3
Trabajo en equipo	16	Integridad	2
Colaboración	13	Franqueza	2
Relaciones interpersonales	13	Actitud abierta	2
Resolución de conflictos	13	Perceptividad	1
Resolución de problemas	12	Inspiración	1
Orientación	12	Humildad	1
Desarrollar el equipo	12	Visión	1
Ética	11	Identificar ideas	1
Inteligencia emocional	11	Efectividad	1
Creatividad	10	Relajación	1
Razonamiento analítico	8	Eficiencia	1
Toma de decisiones	6	Consulta	1
Pensamiento crítico	6	Apreciación de valores	1
Multicultural	5	Dinámico	1
Confianza	5	Ambicioso	1
Adaptabilidad	4	Aprendizaje activo	1
Compromiso	4		

Tabla 9. Escala ordinal para la caracterización de las habilidades.

Escala ordinal	Intervalos sobre la frecuencia	Formulación	Detalle
Mandatorios	(39,14]	$Me = L_{i-1} + \frac{\frac{N}{2} - F_{i-1}}{fi} * a$	Mediana = 13,0000
Importantes	[13,8]		
Deseables	[7,1)	$\bar{X} = \sum_{i=0}^n Xi$	Media = 7,6744

Como resultado final se obtienen las escalas y las habilidades relacionada en cada una de estas (Tabla 10), aquí se puede apreciar qué habilidades sobresalen entre otras partiendo de la importancia que tienen estas en el rol de gerente de proyecto, en función de su gestión diaria con los proyectos de software ágil.

Tabla 10. Habilidades blandas caracterizadas según escala ordinal.

Escala	Habilidad blanda	Escala	Habilidad blanda
Mandatorios	Comunicación	Deseables	Toma de decisiones
	Liderazgo		Pensamiento crítico
	Planeación y Control		Multicultural
	Negociación		Confianza
	Motivación		Adaptabilidad
	Trabajo en equipo		Compromiso
Importantes	Colaboración	Autónomo	
	Relaciones interpersonales	Competencias digitales	
	Resolución de conflictos	Habilidades empresariales	
	Resolución de problemas	Apasionado	
	Orientación	Iniciativa	
	Desarrollar el equipo	Integridad	
	Ética	Franqueza	
	Inteligencia emocional	Actitud abierta	
	Creatividad	Perceptividad	
	Razonamiento analítico	Inspiración	
		Humildad	
		Visión	
	Identificar ideas		
	Efectividad		
	Relajación		
	Eficiencia		
	Consulta		
	Apreciación de valores		
	Dinámico		
	Ambicioso		
	Aprendizaje activo		

Dentro del perfil de gerente de proyectos se identifican seis habilidades que son altamente requeridas, para abordar proyectos de Software Ágil, resaltando la comunicación y liderazgo cuyos porcentajes de intervención superan el 20% (Figura 3).

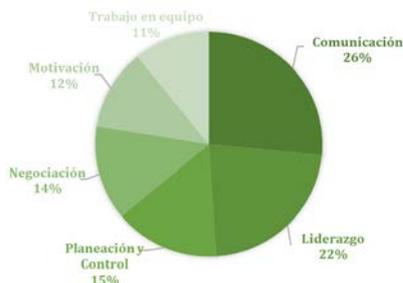


Figura 3. Habilidades altamente requeridas en el gerente de proyectos de desarrollo de Software Ágil

Dentro de las escalas para habilidades blandas, se presentan las cinco más relevantes de cada nivel (Figura 4).



Figura 4. Nivel de importancia – Habilidades más demandadas

5. CONCLUSIONES

Con el estudio realizado como un mapeo sistemático de la literatura, se identificaron 43 habilidades blandas sobre las diversas fuentes documentales consultadas. Los resultados del estudio, que siguió un proceso predefinido, permitieron responder a la pregunta de la investigación planteada inicialmente.

Como respuesta a la pregunta de investigación planteada (*¿Cuáles son las bases de habilidades blandas, y/o atributos personales y comportamiento requeridos para un gerente de proyecto en DPSA?*), se encontraron 43 habilidades blandas caracterizadas en una escala de 3 niveles, donde mandatorios es el nivel superior, importantes es nivel medio y deseables el menor, el nivel superior representan las habilidades más mencionadas y altamente requeridas para un rol de gerente de proyectos que desempeña actividades alrededor del DPSA.

Las habilidades de comunicación siempre se han considerado un conjunto vital de habilidades para llevar a cabo no solo el día a día de la operación, sino también una herramienta significativamente importante cuando un miembro del equipo tiene que relacionarse con clientes o sus compañeros de trabajo. En el desarrollo de software, la interacción con las partes interesadas requiere una excelente comunicación, es por ello por lo que se evidencia en este estudio que la comunicación sigue siendo una de las habilidades más relevantes dentro del rol del gerente de proyectos de software, seguidamente se hace referencia al liderazgo como otra habilidad esencial dentro del gerente, dado que los entornos ágiles son de mucho más dinamismo y cambiantes en sus ciclos cortos, son las dos habilidades más representativas y requeridas para desempeñar una buena gestión de proyectos ágiles (Figuras 3 y 4).

Como trabajo adicional, ahora se está en la elaboración de un diseño para la evaluación de las habilidades blandas requeridas por un gerente de proyecto en entornos Ágiles, a fin de determinar el nivel de desarrollo que están se encuentran y que pueda servir de apoyo a áreas de la organización a tomar mejores decisiones en la conformación de líderes en equipos Ágiles y poder aumentar la probabilidad de éxito de los proyectos.

Otras vertientes que pueden desarrollarse por investigadores pueden ser: la escasez de estas habilidades blandas en roles de gerentes de proyectos de software o qué habilidades blandas están menos desarrolladas en roles de equipos ágiles.

Otro factor de estudio tiene que ver con la falta de estructuración en la inclusión de las habilidades blandas en los planes de estudio en las carreras profesionales relacionadas con ingeniería de software, informática o ciencias de la computación a nivel universitario.

REFERENCIAS

- [1] Lalsing, V., Kishnah, S. y Pudaruth, S. (2012). People factors in agile software development and project management. *International Journal of Software Engineering & Applications*, 3(1), 117.
- [2] Boehm, B. y Turner, R. (2004). *Balancing Agility and Discipline*. Pearson Education.
- [3] Hastie, S. y Wojewoda, S. (2015). Standish Group 2015 Chaos Report - Q&A with Jennifer Lynch. Recuperado: <https://www.infoq.com/articles/standish-chaos-2015>.
- [4] Nee, Y. (2014). Does your team have the soft skills required to run agile correctly? Recuperado: <http://www.nearshoreamericas.com/softer-side-agile-development-leading-collaborative-teams/>.
- [5] Gulla, J. (2011). Seven reasons why information technology projects fail. En SHARE Conference. Orlando, USA.
- [6] Müller, R. y Turner, R. (2010). Leadership competency profiles of successful project managers. *International Journal of Project Management*, 234, 437-448.
- [7] Naranjo, R. (2015). Habilidades gerenciales en los líderes de las medianas empresas de Colombia. *Pensamiento & Gestión*, 34, 119-149.
- [8] Oxford. (2016). Lexico. Recuperado: <https://www.lexico.com/definition/skill>.
- [9] Anderson, J. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89, 354-369.
- [10] Argyris, C. (2002). Double-loop learning, teaching, and research. *Academy of management learning & education*, 49, 206-218.
- [11] Meza, M. (2017). Las habilidades blandas soft skills y sus tendencias, Recuperado: <https://www.linkedin.com/pulse/las-habilidades-blandas-soft-skills-y-sus-tendencias-m%C3%ADler-meza/?originalSubdomain=e>.
- [12] Kechagias, K. (2011). *Teaching and Assessing Soft Skills*. MASS Project.
- [13] Motah, M. (2008). The influence of intelligence and personality on the use of soft skills in research projects among final year university students: a case study. En *Unforming Science & IT Education Conference INSITE 2008*. Varna, Bulgaria.
- [14] Ahmed, F., Capretz, L. y Campbell, P. (2012). Evaluating the demand for soft skills in software development. *IT Professional*, 87, 44-49.
- [15] Ahmed, F. et al. (2013). Soft skills and software development: A reflection from software industry. *International Journal of Information Processing and Management*, 124, 171-191.
- [16] Salfi, M. (2018). Sin Habilidades Blandas no se accede al trabajo ni se asciende. Recuperado: <https://www.gestiopolis.com/sin-habilidades-blandas-no-se-accede-al-trabajo-ni-se-asciende/>.
- [17] Rothstein, M. y Goffin, R. (2006). The use of personality measures in personnel selection: What does current research support? *Human resource management review*, 51, 155-180.
- [18] Kitchenham, B., Budgen, D. y Brereton, P. (2015). *Evidence-based software engineering and systematic reviews*. Chapman.
- [19] PMI. (2018). *PMI Project Management Institute*. Recuperado: <https://www.pmi.org/>.
- [20] PMI. (2017). *Project management competency development framework*. Project Management Institute.
- [21] APM. (2018). *APM Association for Project Management*. Recuperado: <https://www.apm.org.uk/>.
- [22] APM. (2019). *APM Body of Knowledge*. Buckinghamshire.
- [23] IPMA. (2017). *IPMA International Project Management Association*. Recuperado: <https://www.ipma.world/>.
- [24] IPMA. (2015). *Individual competence baseline for project, programme & portfolio management*. IPMA.
- [25] FAI. (2015). *Project Manager's Guidebook*. Recuperado: <https://www.fai.gov/sites/default/files/FAI-Project-Managers-Guidebook.pdf>.
- [26] ISO. (2015). *ISO International Organization for Standardization*. Recuperado: <https://www.iso.org/home.html>.
- [27] PMAJ. (2016). *PMAJ Project Management Association of Japan*. Recuperado: <https://www.pmaj.or.jp/ENG/>.
- [28] AXELOS. (2018). *AXELOS Global Best Practice Solutions*. Recuperado: <https://www.axelos.com/>.
- [29] AAPM. (2014). *AAPM The American Academic Project Management*. Recuperado: <http://americanacademyofprojectmanagement.com/index-2.html>.
- [30] AIPM. (2018). *Australian Institute of Project Management*. Recuperado: <https://www.aipm.com.au/home.aspx>.
- [31] HKIPM. (2017). *Hong Kong Institute of Project Management*. Recuperado: <http://www.hkipm.org.hk/>.
- [32] Mersino, A. (2013). *Emotional intelligence for project managers: The people skills you need to achieve outstanding results*. AMACOM.
- [33] Canty, D. (2015). *Agile for Project Managers (Best Practices in Portfolio, Program, and Project Management)*. Auerbach Publications.
- [34] Englund, R., Bucero, A. y O'Brochta, M. (2019). *The Complete Project Manager: Integrating people, organizational, and technical skills*. B-K. Publishers.
- [35] Matook, S., y Maruping, L. (2014). A competency model for customer representatives in agile software development projects. *MIS Quarterly Executive*, 13(2), 77-95.
- [36] Silva, C. y Drebes, C. (2015). IT project manager competencies and IT project success: a qualitative study. *Organisational Project Management*, 64, 53-75.
- [37] Sutling, K. et al. (2015). Understanding of Project Manager Competency in Agile Software Development Project. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 339, 859-868.
- [38] Araújo, C. y Drebes, C. (2015). The Importance of Soft Skills and IT Project Manager's Personality Type. *International Journal of Professional Business Review*, 167, 40-59.
- [39] Awan, M., Ahmed, K. y Zulqarnain, W. (2015). Impact of Project Manager's Soft Leadership Skills on Project Success. *Journal of Poverty, Investment and Development*, 8(2), 37-89.
- [40] Erasmus, W., Joseph, N. y Marnewick, C. (2016). Competencies of IT project managers a South African perspective. *International Association for Management of Technology*, 187, 408-429.
- [41] Widyarto, S. (2016). Mapping project manager competency for agile software development. *International Conference on Engineering and Applied Science*. Milan, Italy.
- [42] Silvius, G. (2016). Sustainability as project manager competence of project managers. *PM World Journal*, 5(9), 1-13.
- [43] Mtsweni, E., Hörne, T. y van der Poll, J. (2016). Soft Skills for Software Project Team Members. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 8(2), 150-155.

- [44] Blaskovics, B. (2016). The impact of project manager on project success - The Case of ICT Sector. *Society and Economy*, 38(2), 261-281.
- [45] Jena, A. y Satpathy, S. (2016). Importance of Soft Skills in Project Management. *International Journal of Scientific Research and Management*, 5(7), 6173-6180.
- [46] Livesey, P. (2017). Goleman-Boyatzis Model of Emotional Intelligence for Dealing with Problems in Project Management. *Construction Economics and Building*, 17(1), 20-45.
- [47] Iriarte, C. y Orè, S. (2017). Soft Skills for IT Project Success: A Systematic Literature Review. *Software Process Improvement*, 57, 147-158.
- [48] Afzal, A., Khan, M. y Mujtaba, B. (2018). The impact of project managers' competencies, emotional intelligence and transformational leadership on project success in the information technology sector. *Marketing and Management of Innovation*, 2, 142-154.
- [49] Gren, L., Knauss, A. y Stettina, C. (2018). Non-Technical Individual skills are weakly connected to the maturity of agile practices. *Information & Software Technology*, 99(99), 11-20.
- [50] Rogo, V., Rarasati, A. y Gumuruh, H. (2018). The influence of transformational leadership and soft skills on project manager for project success factors. *Materials Science and Engineering*, 830(2), 1234-1243.
- [51] Singla, K. y Rajkumar, D. (2019). Develop Agile Leadership Competency Model to Drive Project Performance in IT Organizations. *Journal of Advances and Scholarly Researches in Allied Education*, 16(6), 1182-1188.
- [52] Lenz, K. (2019). Communication Skills and Teaming are a Project Manager's Best Tools. En *User Services Conference*. Seul, Corea.
- [53] Gulati, R. et al. (2020). The Contribution of Project Managers' Soft Skills to their Project Success. ANZAM. Society for Human Resource Management. (2016). Reporte de industria reclutamiento. Recuperado: <https://www.shrm.org/hr-today/trends-and-forecasting/research-and-surveys/pages/entry-level-applicant-job-skills-survey-.aspx>.
- [54] ManpowerGroup. (2016). Soft Skills 4 Talent. Recuperado: http://www.manpowergroup.es/data/files/Estudios/pdf/Soft_Skills_4_Talent_-_Estudio_Human_Age_Institute_636171371353225000.pdf.
- [55] Joblift. (2017). Reporte de industria portal de empleo. Recuperado: <https://cosmic-s3.imgix.net/0c4f55d0-bd87-11e7-ba42-ebce9fce8a6a-European%20Startup%20Report.pdf>.
- [56] ManPower. (2018). Skills Revolution 2.0. Recuperado: https://www.manpowergroup.com/wps/wcm/connect/59db87a7-16c6-490d-ae70-1bd7a322c240/Robots_Need_Not_Apply.pdf?MOD=AJPERES.
- [57] LinkedIn Talent Solutios. (2019). Global Talent Trends. Recuperado: <https://business.linkedin.com/talent-solutions/blog/trends-and-research/2019/global-recruiting-trends-2019>.

Identificación y análisis a los avances de la investigación relacionada con el gobierno de TI en PYMES: Una revisión

Yeni Paola Trujillo-Lambert¹

Gina Maestre-Góngora¹

Mariutsi Alexandra Osorio-Sanabria²

¹Universidad Cooperativa de Colombia

²Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

Actualmente el área de Tecnologías de la Información (TI) ha cobrado importancia en el funcionamiento de las empresas debido a que los cambios se han vuelto más frecuentes y parecen ser más rápidos que la capacidad de ajuste, razón por la cual el área TI paso de ser un área de apoyo y soporte a hacer parte de las áreas estratégicas para la consecución de logros y metas. Teniendo en cuenta los beneficios que se pueden encontrar en la incorporación del gobierno TI en las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES) y en especial para aquellas que prestan servicios en el sector del software, en este documento se realiza un mapeo sistemático de literatura entre 2011 y 2020 en un conjunto inicial de 166 artículos, de los cuales se seleccionaron un total de 18 artículos identificando una metodología que adaptada suple las necesidades de la PYMES del sector del software.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al mercado competitivo del siglo XXI, las empresas independientemente de su tamaño han reconocido la importancia del uso de las Tecnologías de la Información (TI) para automatizar procesos, suministrar plataformas de información, ahorrar recursos y minimizar riesgos [1]. Entre estas empresas se encuentran las enfocadas al desarrollo de software, las cuales, usan las TI para la entrega de servicios y aplicaciones a partir de las especificaciones y los requerimientos establecidos por el cliente. En este escenario, las organizaciones han requerido contar con mecanismos claros para el gobierno TI con el fin de lograr el mayor beneficio posible a través del uso de las TI [2].

El gobierno TI, tal como presenta [3], ha recibió mayor atención por parte de organizaciones, académicos y profesionales desde finales de la década de los 90. Este interés permitió que se definiera como el proceso mediante el cual se toman, realizan y transforman las decisiones con respecto a las TI [4]. Este proceso hace seguimiento a la formulación y aplicación de estrategias, mediante modelos, estructuras y mecanismos relacionados con la organización a través de los cuales se apoya la alineación y creación de negocios de TI equilibrando riesgos y oportunidades [5]. Todo lo anterior, con el objetivo de generar valor al negocio, así como satisfacer las demandas presentes y futuras de la empresa [6].

La implementación del proceso de gobierno TI en las PYMES las cuales se definen utilizando criterios cuantitativos y cualitativos [7], no ha sido eficiente ni competitivo dado que, existen factores a nivel de presupuestos y cultura organizacional que no lo han permitido. Teniendo en cuenta lo anterior, surge el interés de analizar cómo llevar a cabo un adecuado gobierno TI en PYMES del sector software. Cabe mencionar que en la revisión de literatura realizada por Silva et al. en [8] sobre el gobierno TI en las PYMES se encontró cuales mecanismos estructurales, de procedimiento y relacionales son los más utilizados para abordar la gobernanza de TI por medio de indicadores de TI, acuerdos de nivel de servicio y marcos reconocidos como Objetivos de Control para la Información y Tecnologías Relacionadas (COBIT®) o La Biblioteca de Infraestructura de Tecnologías de Información (ITIL) los cuales incluyen la participación de TI en los negocios. Sin embargo, [8] no tiene un enfoque en las empresas del sector del software.

Con base en lo anterior, en este trabajo proponemos analizar e identificar los avances de investigaciones por medio de un mapeo sistemático de literatura sobre el gobierno TI en las PYMES publicadas entre 2011 y 2020. Con el objetivo de identificar cuáles son las consideraciones que se deben tener en cuenta para desarrollar un modelo de gobierno TI bajo el enfoque de gestión de conocimiento partiendo de las metodologías existentes. A partir de la revisión realizada y el análisis de los estudios seleccionados, se identificaron aspectos generales de las publicaciones, los estándares de gobierno TI adoptados en los estudios para la implementación de TI, el alcance de las implementaciones de gobierno TI y los objetivos de la implementación de gobierno de IT en las PYMES, en un conjunto inicial de 167 artículos, de los cuales se seleccionaron un total de 18 artículos.

Este trabajo está dividido en las siguientes secciones: la sección 2 se describe el marco conceptual, en la sección 3 se describe la metodología de mapeo de la literatura de trabajos previos relacionados con el alcance de esta investigación, la sección 4 presenta la discusión de los resultados obtenidos para las preguntas planteadas. Finalmente, en la sección 5 se reportan las conclusiones derivadas de las contribuciones y limitaciones del estudio, así como, el trabajo futuro.

2. MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se presenta los referentes conceptuales y estado del arte que soportarán el desarrollo de la propuesta.

2.1 Gobierno de TI

Es el conjunto de procedimientos, estructuras y comportamientos utilizados para dirigir y controlar la organización hacia el logro de sus objetivos por medio de planes estratégicos ejecutables. Cabe mencionar que el gobierno TI, cubre desde la estructura organizacional hasta el enfoque en el proceso; la estructura organizacional implica la existencia de responsables tales como directivos, personal de negocios y ejecutivos de TI que apoyen la toma de decisiones; así mismo los procesos de gobierno TI implican la implementación de procedimientos y técnicas de conformidad con estrategias y políticas de TI establecidas [9]. Vejar en [10] resalta que para lograr el éxito de la implementación de gobierno TI se deben considerar aspectos como alineación, informes y entregas basados en repositorios corporativos, normas industriales y regulación del entorno.

Se debe mencionar que un gobierno TI exitoso requiere un lenguaje común basado en relaciones constructivas que fomente la comunicación entre todas las partes, además de un compromiso compartido en el cumplimiento de las políticas y procedimientos definidos por el comité directivo [9]. Así mismo y considerando lo presentado por Alreemy et al. en [11] se debe tener claro que no existe un estándar o marco único, que cubra todos los procesos de gobierno TI por sí solo y que sea suficiente para implementar de manera completa y eficiente, es por esto que resaltan la importancia de evaluar las fortalezas y debilidades del negocio y adoptar selectivamente una combinación de los elementos relevantes de los marcos y estándares de mejores prácticas.

2.2 Gobierno TI en las PYMES

El mercado mundial el desarrollo de software está constituido en un 90% por PYMES [12]. No obstante, no logran aplicar de manera efectiva, mecanismos tales como estándares, herramientas, técnicas o marcos desarrollados externamente como COBIT, ITIL, ISO / IEC 38500 que alineen sus estrategias de TI con el negocio [6], debido a que las diferentes metodologías existentes para la mejora de los sistemas de información están desarrolladas para las grandes empresas, dejando a un lado a las PYMES [13].

Teniendo en cuenta lo anterior, en la implementación de los procesos de gobierno TI se debe resaltar la gestión del conocimiento la cual se define como el conjunto de procesos que permiten utilizar el conocimiento como factor clave para añadir y generar valor a la organización [14]. Considerando que, la ruptura de los límites del organigrama, la información, ideas y conocimientos puede influir en la organización con rapidez, disminuyendo los tradicionales límites entre niveles jerárquicos y funciones, al mismo tiempo que facilita estructuras.

2.3 Metodologías existentes para implementar el gobierno TI

Resaltando que es importante evaluar las fortalezas y debilidades del negocio de las PYMES para poder así adoptar selectivamente una combinación de estándares, en la Tabla 1 se presentan los estándares de gobierno TI.

Tabla 1. Estándares usados para el desarrollo de los marcos de gobierno TI

Estándares	Descripción	Áreas/Procesos	
COBIT	Para [15] este estándar asegura y supervisa que las necesidades de las partes interesadas sean priorizadas y evaluadas para determinar los objetos de la empresa mediante la toma de decisiones por medio de cinco áreas de enfoque con el fin de garantizar la implementación del gobierno TI. Por su parte [16] manifiesta que este estándar ayuda a mantener el equilibrio entre la generación de beneficios, la optimización de los niveles de riesgo y el uso de recursos. Así mismo Cordero en [17] resalta que COBIT es un marco de trabajo que distingue y separa al gobierno de la gestión de TI integrando otros marcos como las normas ISO, riesgos de TI e ITIL. A continuación se presenta los procesos de gobierno TI [18, p. 33] y las áreas de enfoque [19]	Procesos de gobierno TI 1) Evaluar 2) Orientar 3) Supervisar	Áreas de enfoque 1) Alineación estratégica 2) Entrega de valor 3) Administración de recursos 4) Administración de riesgos 5) Medición del desempeño
ISO / IEC 38500	Identifica el papel fundamental que representan los consejos y miembros de la alta dirección de las organizaciones, donde se resaltan tres tareas clave de gobierno TI [9]. A continuación se presenta las áreas y principios [20]	Áreas: 1) Evaluar 2) Dirigir; 3) Monitorear	Principios: 1) Responsabilidad; 2) Estrategia; 3) Adquisición; 4) Desempeño; 5) Conformidad 6) Comportamiento humano
ITIL	Promueve el alineamiento e integración de la TI con la organización basado en el concepto de ciclo de vida de servicio, por medio de un marco de procesos, roles y funciones necesarias para una correcta ejecución de TI [21]. A continuación se describen las fases según ITIL [22]	Fases: 1) Estrategia del servicio. 2) Diseño del servicio 3) Transición del servicio. 4) Operación del servicio. 5) Mejora continua del servicio.	
Val-IT	Conjunto de conductores de valor del negocio que están influenciados por factores del entorno, alineados directamente con el nivel de madurez de los procesos [6]	Procesos: 1) Gobierno de valor. 2) Gestión de cartera. 3) Gestión de inversiones.	

<p>PMBOOK</p>	<p>Grupo de 49 procesos que contiene un conjunto de áreas de conocimiento relacionadas. Cada grupo de procesos genera salidas producidas por procesos de gestión de proyectos que apoya la implementación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas en una amplia gama de actividades que se componen de entradas y herramientas y técnicas que generan salidas para la realización de cualquier proyecto [23]</p> <p>Para la gobernabilidad del proyecto es una función de supervisión que está alineada con el modelo de gobierno de la organización que abarca el ciclo de vida del proyecto. El marco de gobierno proporciona al director y al equipo del proyecto la estructura, los procesos, los modelos de toma de decisiones y las herramientas para dirigir el proyecto, a la vez que apoya y controla el proyecto para lograr una entrega exitosa. Teniendo en cuenta que la gobernabilidad del proyecto es un elemento crítico de cualquier proyecto, particularmente en el caso de proyectos complejos y de alto riesgo [24].</p>	<p>Criterios de éxito del proyecto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) El proceso para identificar, escalar y resolver incidentes que surjan durante el proyecto; 2) La relación entre el equipo del proyecto, los grupos de la organización y los interesados externos; 3) El organigrama del proyecto que identifica los roles del mismo; 4) Los procesos y procedimientos para la comunicación de información; 5) Los procesos para la toma de decisiones del proyecto; 6) Las guías para alinear la gobernabilidad del proyecto con la estrategia de la organización; 7) El enfoque del ciclo de vida del proyecto; 8) El proceso para la revisión de fases o cambios de etapas; 9) El proceso para la revisión y aprobación de cambios al presupuesto, al alcance, a la calidad y al cronograma que están fuera de la autoridad del director del proyecto; 10) El proceso para alinear a los interesados internos con los requisitos de los procesos del proyecto
---------------	---	---

3. MÉTODO

Con los datos de promedio diarios registrados en los aforos, según la capacidad de los equipos, se procedió a tabularlos e integrarlos a un análisis. Esta investigación tiene como objetivo identificar las consideraciones necesarias para desarrollar un modelo de gobierno TI enfocado en las PYMES del sector del software. La metodología implementada tiene un enfoque cualitativo por medio de un proceso de dos etapas: 1) planificación, y 2) presentación de informes. Las cuales se basan en la propuesta de [25] y los aspectos propuestos en la lista de verificación de la declaración PRISMA, las cuales se presentan en la Figura 1.



Figura 1. Metodología de elaboración basada Osorio [26]

3.1 Planificación de la revisión

Considerando que la revisión de literatura define una base sólida que facilita la identificación de áreas en las que se requiere mayor investigación. A continuación, se presenta el protocolo de revisión de la literatura definido en la primera etapa de planificación.

3.1.1 Determinar el nivel de análisis y pregunta de investigación

Se definió ¿Cuáles son las consideraciones que se deben tener en cuenta para desarrollar un modelo de gobierno TI en una PYMES del sector del software? Como la pregunta de investigación orientadora del estudio. Para responder a la pregunta principal de investigación, definimos dos preguntas auxiliares:

- ¿Cuáles son los estándares comunes entre las metodologías existentes para implementar el gobierno TI en las PYMES?
- ¿Cuáles son las características que afectan la implementar el gobierno TI en las PYMES?

3.1.2 Definir la estrategia de búsqueda

Se definió la búsqueda de estudios en cuatro bases de datos: SCOPUS, SCIELO, IEEE Xplore y Springer, para el período de 2011 a 2020. Además, se estableció identificar los artículos de revista y conferencias. La cadena de búsqueda se definió en función de los términos que respondería mejor a las preguntas de investigación siendo estos: gobierno de TI, IT Government, gobernanza de TI, IT Governance, gestión TI, IT Management, PYMES, SMEs y Software. Esta ecuación se aplicó a título. A continuación, se presenta la cadena de búsqueda aplicada en cada base de datos en mayo de 2020 Tabla 2.

Tabla 2. Ecuaciones y resultado de la búsqueda por base

Base de datos	Ecuación de búsqueda	Documentos
IEEE	(IT Government OR IT Governance) OR IT Management AND SMEs	4
SCIELO	("IT Government" or "IT Governance" or "IT Management") and ("SMEs")	1
SCOPUS	("IT Government" or "IT Governance" or "IT Management") and ("SMEs" or Software)	159
SPRINGER	"IT Governance" and SMEs	2
Total		166

3.1.3 Seleccionar documentos

Con base en los resultados se realizó la siguiente clasificación:

1. Criterios de inclusión: Se consideraron artículos en revista y conferencias publicados entre el 2011 y 2020.
2. Criterios de exclusión: Se descartaron los estudios de acuerdo con los lineamientos de la declaración de PRIMA, a través de tres filtros para seleccionar los estudios que se encuentran directamente alineados con el enfoque del estudio. Se utilizó la herramienta COVIDENCE para sistematizar la selección.
 - Filtro 1: Eliminación de duplicado.
 - Filtro 2: Revisión del título y el resumen con el fin de identificar cuales tienen los términos "gobierno TI" o "PYMES" en los títulos y resúmenes.
 - Filtro 3: Escaneo del texto completo, para identificar estudios que no contribuyen en la respuesta de las preguntas planteada y los artículos que no se pueden acceder

Después de aplicar los criterios de inclusión y exclusión en los 166 documentos obtenidos en la revisión sistemática, se llegó a un resultado final de un conjunto de 18 documentos como se puede ver en la Figura 2. Los cuales, representa el 10.84% de los documentos identificados en la búsqueda.

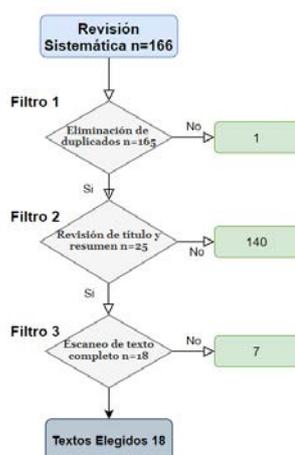


Figura 2. Mapa de resultados de la consulta

3.1.4 Clasificar documentos

A partir del análisis de los estudios seleccionados, se establecieron las categorías de clasificación que se presentan a continuación por:

1. Aspectos generales de las publicaciones, en esta sección se clasificaron los resultados de la búsqueda por tipo de documento (Artículo de revista y de conferencia) y por coocurrencia de términos en palabras claves usando la herramienta VOSviewer.
2. Estándares de gobierno TI adoptados en los estudios para la implementación de TI. Los estándares considerados se corresponden con los presentados en la Tabla 1 del marco conceptual: COBIT, ISO, ITIL, ValIT y PMBOK.
3. Alcance de la implementación del gobierno TI establecido en los estudios seleccionados.
4. Objetivos de la implementación del gobierno TI en las PYMES, los objetivos definidos Tabla 3 se establecen con base en las necesidades de las partes interesadas partiendo de la visión general de COBIT 5 [18], los cuales permiten definir las metas empresariales. Resaltando que esto permite a las organizaciones tener una visión general sobre como los objetivos alinean los componentes (proyectos, programas u operaciones).
5. Caracteres que afectan la implementación de gobierno TI, de acuerdo con tres aspectos: cultura, flexibilidad y recursos. En la Tabla 4, se describen los aspectos propuestos.

Tabla 3. Objetivos del gobierno TI según COBIT

Objetivo	Descripción
Obtención de beneficios	Establece las actividades de mejora del proceso [24].
Gestión del riesgo	Establece procesos que disminuyen el riesgo del proceso, creando así la necesidad de una planificación [24].
Seguridad relacionada con TI	Establece roles y responsabilidades que permita limitar la complejidad y la interdependencia en la seguridad de la información en los procedimientos de TI [27].
Gestión del conocimiento	Define conjunto de procesos que permiten utilizar el conocimiento como factor clave para añadir y generar valor a la organización [14].

Tabla 4. Aspectos que agrupan las características que limitan la implementación del gobierno TI

Aspecto	Descripción
Cultura	Se define con base al principio 4 hacer posible un enfoque holístico presentado en COBIT5, partiendo del hecho que un gobierno TI efectivo y eficiente requiere de un enfoque holístico por medio de catalizadores que tenga en cuenta varios componentes interactivos que ayudan a conseguir las metas de la empresa [18].
Flexibilidad	Se define con base al principio 2 cubrir la Empresa Extremo-a-Extremo presentado en COBIT5, teniendo en cuenta que este cubre todas las funciones y procesos dentro de la empresa [18].
Recursos	Se define con base al principio 1 satisfacer las necesidades de las partes interesadas presentado en COBIT5, considerando que las empresas existen para crear valor para sus partes interesadas con el fin de mantener un equilibrio entre la realización de beneficios y la optimización de los riesgos y el uso de recursos [18].

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la revisión, los cuales se corresponden a la segunda etapa de la metodología presentación de informes.

4.1 Aspectos generales de las publicaciones

Con el fin de analizar cuál es el estado del tema analizado, en Figura 3 se presenta un diagrama de concurrencia de términos en palabras claves a partir de los resultados obtenidos en la base de datos SCOPUS las cuales agrupan la mayor parte de los resultados. Identificando que, si bien el gobierno TI tiene relación con términos como PYMES y con el software como servicio, los trabajos enfocados con las PYMES no se han integrado o desarrollado para empresas del sector del software.

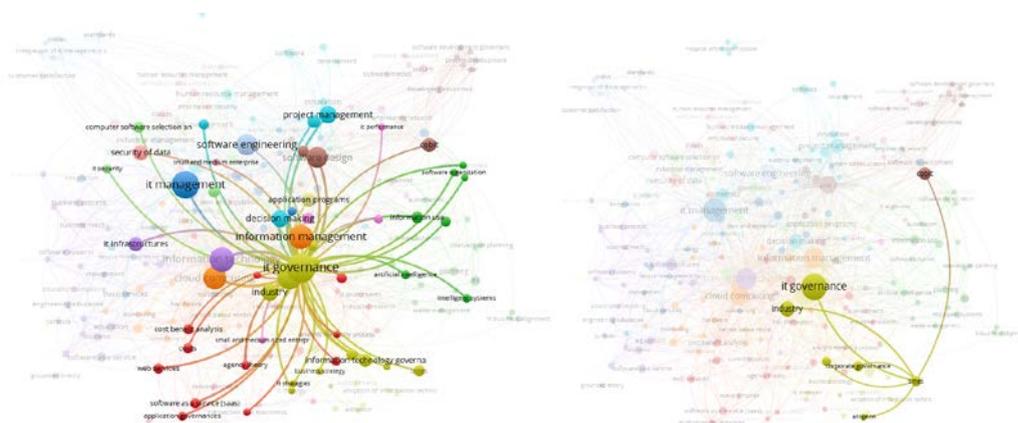


Figura 3. Análisis de concurrencia de términos asociados con las palabras claves de la búsqueda

Por otro lado, en la Figura 4 se puede evidenciar que es el gobierno TI en las PYMES un tema actualmente de interés debido a la necesidad actual de que tienen las empresas de cumplir con los marcos regulatorios y ser competitivos en el mercado.

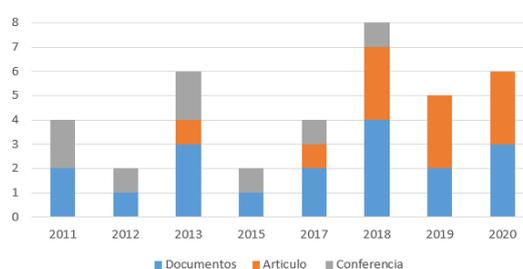


Figura 4. Clasificación de documentos por año

4.2 Clasificación de estudios que utilizan estándares para la implementación de gobierno TI

En la Tabla 5 se presenta el uso de los estándares por ocho de los autores que hacen referencia al desarrollo de los modelos para implementar el gobierno TI. A continuación, se presenta la explicación de las mismas.

Tabla 5. Estándares usados en los modelos

Estudios	COBIT	ISO / IEC 38500	ITIL	Val -IT	PMBOOK	Otros
[28, 29]	x	x				
[7]		x				
[30]	x	x	x			
[31]			x	x	x	
[32,33, 34]						x

Iniciando con Ayat et al. en [7] los cuales proponen el estándar ISO / IEC 38500 como marco de referencia para un gobierno TI eficaz que apoya a la alta dirección de las organizaciones en la comprensión y el cumplimiento de las obligaciones legales, normativas y éticas. Este marco incluye definiciones, principios y un modelo basado en seis principios Responsabilidad, estrategia, adquisición, desempeño, conformidad y comportamiento humano. No obstante, resaltan que la mejor opción es personalizar y reducir los estándares y marcos existentes para que se ajusten a las PYMES considerando que por lo menos COBIT solo define una amplia gama de objetivos dentro de cuatro dominios y no determina cómo alcanzarlos. Así mismo ITIL no menciona *cómo hacer* los procesos, sino que solo menciona *qué hacer* a los procesos. Conforme a lo anterior Yamami et al. en [31] presentan un marco que respondan a una necesidad específica combinando los marcos de buenas prácticas de ITIL, PMBOOK y Val IT los cuales cubren los principales procesos del departamento de TI de la PYMES.

De forma similar Frogeri et al. en [30] exponen un método de gobierno TI que integra tácticas como la de dirección de los comités de agitación, mecanismos relativos como el aprendizaje compartido y la división organizacional además de estándares como COBIT, ITIL e ISO / IEC 38500 por medio de una herramientas de implementación en el contexto de estas cinco áreas: 1) gestión estratégica, 2) gestión de procesos, 3) valor de entrega, 4) gestión de riesgos y 5) gestión del rendimiento considerando las limitaciones en términos de costos e inversión en recursos humanos de las PYMES. Así mismo De casto y Hernandez en [29] proponen un método con una visión holística de las operaciones comerciales, que contribuye a conectar objetivos estratégicos a largo plazo con acciones a corto plazo a través de la perspectiva BSC-IT la cual ayuda a organizar información, crear un consenso entre las partes interesadas sobre los objetivos estratégicos de TI por medio de un indicador que está asociado al proceso interno por medio de métricas de software que contribuyen a las tres actividades (evaluar, dirigir y monitorear) de gobierno TI de ISO 38500.

A diferencia de los autores anteriores Nguyen et al. en [34] realizan un modelo SR de GI-Tropos a través de un plan de iteración con tres actores principales (Operador, Junta de Administración de Servicios de TI y Junta de Gobierno de TI) y servicios centrales de gobernanza (Evaluar, Dirigir y Monitorear) y administración (Planificar, Implementar, Despachar y Evaluar). Este modelo permite que todos los interesados compartan una vista agregada de los servicios, incluidas sus relaciones de dependencia e ilustra las amenazas (Riesgo y Recursos) y las expectativas de calidad (Configuración y Mantenimiento, Entrega de Beneficios y Transparencia de las partes interesadas).

Por otra parte, [28] proponen una metodología Análisis de contenido cualitativo (QCA) basada en la hermenéutica con el fin de manejar diversas fuentes de información y diferentes niveles de abstracción. El método se presentó después de conocer las necesidades del dominio, identificar las barreras y seguir un método de ingeniería de requisitos considerando que los métodos convencionales son vistos como demasiado complejos y / o no completamente aplicables. Dando como resultado un método simplificado de gobernanza de ITSM / IT, que reúne la alineación, la planificación, la implementación, la operación y el control de los servicios de TI de negocios y TI de una manera muy simple y modular.

Cabe señalar que Bergeron et al. en [32] presentan un marco conceptual basado en una combinación de teorías alternativas: teoría del escalón superior, teoría de las partes interesadas, teoría de la dependencia de los recursos, teoría institucional y la teoría de la confianza institucional, que reconoce el papel central desempeñado por el propietario-gerente en todas las decisiones importantes de la empresa teniendo en cuenta que el tamaño de la empresa es una de los parámetros principales al diseñar una combinación de estructuras. Finalmente, Frogeri et al. [33] presentan un modelo teórico dinámico basado en teorías interdisciplinarias (DOI, TOE e Iacovou) que involucran aspectos individuales (sociales) y los entornos internos y externos de la organización además de variables ambientales en una perspectiva dinámica, capaz de explicar diferentes contextos en los que se puede aplicar la TI para generar valor comercial, desarrollar una ventaja competitiva o ampliar las capacidades existentes.

4.3 Clasificación por alcance de la implementación del gobierno TI

A partir de la lectura de los estudios seleccionados se identificaron diez alcances del gobierno TI. A continuación, en la Tabla 6 se presenta la clasificación de los estudios por los alcances que establecen los estudios analizados. Se

encontró que, cinco estudios se centran en evaluar si el gobierno TI es aplicable a las PYMES con el fin de identificar los problemas que se puedan presentar en la implementación [7, 28, 32, 35, 36]. Lo anterior se presenta debido a que un efectivo gobierno TI ayuda a las juntas directivas y a la administración a brindar soluciones de TI bajo estándares de calidad, dentro del tiempo y presupuesto establecido. De igual forma, se observó que existen estudios que se orientan hacia la presentación de fundamentos teóricos que apoyan la definición de modelos de gobierno TI en PYMES [15, 30, 33, 37]. Así mismo, se evidencia que dos estudios buscan identificar y evaluar los mecanismos apropiados para abordar la gobernanza de TI en el contexto de las PYMES con el fin de presentar la necesidad que existe de adaptar marcos existentes a la realidad de las PYMES [8, 38].

Tabla 6. Alcance del gobierno TI en los estudios analizados

Estudios	Alcance
[7, 28, 32, 35, 36]	Evaluar si el gobierno TI es aplicable a las PYMES e identificar los problemas que se puedan presentar en la implementación
[15, 30, 33, 37]	Presentar fundamentos teóricos para definir un modelo de gobierno TI en las PYMES
[8, 38]	Identificar y evaluar los mecanismos apropiados para abordar la gobernanza de TI en el contexto de las PYMES
[39]	Resumir los aspectos claves de los modelos de gobierno TI
[40]	Presenta las capacidades dinámicas que deben desarrollarse para adoptar de manera eficiente las TI
[41]	Validar como el gobierno TI apoya el rendimiento de TI en el contexto específico de las pymes
[31]	Definir un patrón para apoyar la selección del marco de gobierno TI
[42]	Presentar y analizar los cinco dominios de gobernanza de TI en PYMES
[29]	Presenta una herramienta para mejorar el gobierno TI en el área de desarrollo de software
[34]	Alinear procesos de software basados en requisitos con el gobierno TI

De otro lado, se observó que existen estudios con alcances específicos. Albayrak y Gadatsch en [39] se enfocan en los aspectos claves de los modelos de gobierno TI definidos como control de la organización de TI, estrategia y planificación de TI, sistema de medición del rendimiento de TI, y normas para proyectos de TI, teniendo en cuenta que la gobernanza de TI dirigidas a las PYME apenas se consideran en la literatura, razón por la cual, no existen conceptos específicos establecidos entre los diferentes modelos que sean ágiles y que cuenten con herramientas para las funciones principales. Por su parte, Khalil y Belitski en [40] presentan un marco de gobierno TI basado en las capacidades dinámicas que responde rápidamente a los cambios de la TI que tienen como propósito identificar cómo interactúan los mecanismos (procesos, estructuras y relaciones) y los dominios de gobierno TI (Estrategia, Gestión y Operaciones) entre sí, con el entorno externo para facilitar el rendimiento de la empresa. De manera similar Raymond et al. [41] presentan un modelo de gobierno TI que permite desarrollar las capacidades estratégicas de TI considerando los recursos y, más específicamente las capacidades de la organización.

Dado el problema de la multiplicidad de marcos de sistemas de TI, Yamami et al. [31] presentan un patrón para apoyar la selección del marco de gobierno TI en las organizaciones con el fin de superar los problemas de superposición, contradicción y redundancia entre estos marcos además de mejorar el rendimiento del departamento de TI. Teniendo en cuenta, que en muchas organizaciones TI se ha vuelto crucial el soporte, la sostenibilidad y el crecimiento del negocio. Miyamoto y Kudo [42] realizan, un estudio que analiza los cinco dominios de TI, considerando las TI como un enfoque específico del gobierno TI con el fin de racionalizar y coordinar la toma de decisiones relacionadas para que los activos, esfuerzos e inversiones de TI estén alineados con las intenciones, estratégicas y tácticas de la empresa.

A diferencia de los trabajos anteriores que estaba enfocados en PYMES, De castro y Hernandes [29] proponen un software que permite indicar si el gobierno TI está funcionando o no, a partir de una métrica compuesta por indicadores para ayudar a revelar a la alta gerencia la situación real del área de desarrollo de sistemas, centrándose en el progreso hacia los objetivos estratégicos. Lo cual que permite crear nuevas oportunidades, producir cambios en las capacidades de la organización además dirigir e impulsar la TI para lograr sus objetivos alineados con la estrategia de la empresa. Finalmente y considerando que existen pocas investigaciones específicas sobre el gobierno de los procesos de software Nguyen et al. [34] presentan un marco de proceso iterativo llamado GI-Tropos que permite alinear procesos de software basados en los requisitos del gobierno TI, el cual, garantiza que los resultados de los procesos comerciales de una organización de software cumplan con los requisitos estratégicos de la organización además de mejorar el manejo de la gestión de riesgos, la gestión del tiempo, la gestión de la calidad y gestión de procesos de software; ya que integra las cinco fases de I-Tropos para el proceso de ingeniería de software (Configuración, Diseño, Construcción, Configuración y Operación), los procesos centrales de gobierno (Evaluar, dirigir y supervisar) y la gestión (planificar, implementar, entregar y evaluar).

4.4 Clasificación por objetivos de la implementación del gobierno TI en las PYMES

En el análisis de los documentos presentados en la Tabla 7, identificamos que la nueve de los estudios buscan la obtención de beneficios lo cual está asociado con asegurar un valor óptimo de las actividades, servicios y activos habilitados por TI, optimizando así la contribución y el valor de TI para el negocio independientemente de la industria, el tamaño o la madurez [7, 15, 28, 30, 32, 33, 37, 38, 40]. Finalmente se debe resaltar que existen artículos que se enfocan en otras áreas como la gestión de calidad, el gobierno de procesos de software [34], la gestión de recursos de TI [42], la gestión del rendimiento y la gestión profesional de TI [39].

Tabla 7. Objetivos de la implementación del gobierno TI

Estudios	Beneficios	Gestión del riesgo	Seguridad relacionada con TI	KM	Otros
[7, 15, 28, 30, 32, 33, 37, 38, 40]	x				
[41]	x				x
[42]	x	x			x
[34]	x	x		x	x
[36]			x	x	
[35]				x	
[8, 31, 39]					x

4.5 Características que afectan la implementación del gobierno TI en las PYMES

Las PYMES muestran una mayor dependencia con respecto a sus recursos y competencias de TI, en comparación con las grandes empresas [41]. Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 8 se presentan las principales características que limitan la implementación del gobierno TI en las PYMES agrupadas por cultura, flexibilidad y recursos siendo estas, las principales razones que impide la alineación estratégica de TI, presentes en 12 de los 18 artículos analizados.

Tabla 8. Características que afectan la implementación del gobierno TI

Estudios	Cultura	Flexibilidad	Recursos
[7, 8, 15, 28, 30, 36, 38]	x	x	x
[31, 35]		x	x
[32, 34]			x

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como respuesta a la pregunta ¿Cuáles son los estándares comunes entre las metodologías existentes para implementar el gobierno TI en las PYMES? en la Tabla 5, se visualiza que entre los ocho autores que desarrollan métodos de gobierno TI se identifica una tendencia a combinar estándares comunes como los presentados en la Tabla 1, con el objetivo de desarrollar modelos más simples que considere aspectos como dinero y recursos los cuales son escasos dentro de las PYMES. Resaltando que la columna que hace referencia a otros se presentan modelo SR de GI-Tropos, metodología Análisis de contenido cualitativo y un marco conceptual basado en una combinación de teorías alternativas.

También se puede apreciar que entre los alcances comunes el objetivo es aprovechar y explotar la TI, para devolver el valor comercial, aumentar la eficiencia y productividad mientras se administran los riesgos de TI involucrando así procesos, estructuras y mecanismos relacionales para apoyar la alineación de negocios / TI y la creación de valor comercial a partir de inversiones en TI. Así mismo, se observó de la clasificación por objetivos de la implementación del gobierno TI, que son muy pocos los estudios que se enfocan en apoyar la seguridad relacionada con TI a pesar de que la información es uno de principales recursos de cualquier entidad, de igual manera en la Tabla 6 se visualiza que la gestión del conocimiento entre el personal y los procesos que lleva la empresa tampoco se presenta como un objetivo específico entre los marcos de gobierno TI a pesar de que la implementación del mismo mejora la comunicación efectiva y oportuna entre las partes interesadas.

Finalmente para responder la pregunta ¿Cuáles son las características que afectan la implementar el gobierno TI en las PYMES? se puede observar en la Figura 5 que las características con más referencias asociadas con el factor de cultura están relacionadas a la falta de un departamento de TI, falta de estructuras, falta de políticas y poca documentación lo cual se aprecia como una desventaja competitiva en las PYMES. Mientras que las características con más referencias asociadas con el factor de flexibilidad están relacionadas con limitaciones por regulaciones gubernamentales, factores externos (ubicación, sector, alcance, entre otros) lo que genera la toma de decisiones sin respaldo.



Figura 5. Detalle de los factores que componen cada una de las características

Lo anterior va asociado con el factor de recursos teniendo en cuenta que existe limitación en recursos tanto humanos como económicos lo cual se refleja en la existencia de empleados multitalentados adaptables a diferentes puestos dentro de la empresa. Lo que hace que se aumente la confianza y se disminuya la conciencia de que cada inversión en TI debe estar alineada con la estrategia comercial para no perder el enfoque en los objetivos comerciales.

Es importante resaltar que la implementación de un gobierno TI en las PYMES trae consigo beneficios como se visualizan en la Tabla 9, asociados con más inversiones para capacitación en habilidades técnicas y de gestión, además del aumento en la eficiencia dentro de los sistemas de información de la empresa, así como la priorización del presupuesto de TI, permitiéndole a los gerentes de la empresa tener el apoyo para tomar decisiones que favorezcan el crecimiento de la empresa y la competencia global de la misma en los procesos comerciales [40].

Tabla 9. Beneficios de implementar el Gobierno de TI en PYMES

Cultura	Flexibilidad	Recursos
Aumento de productividad	Apoya la toma de decisiones	Optimiza las inversiones
Aumenta la eficacia de TI	Define buenas prácticas asociadas con la comunicación	Fomenta la capacitación de los recursos
Fomenta la mejora continua	Mejora la competitividad	Fomenta el desarrollo socioeconómico
Permite establecer una estructura y determinar la forma más eficaz de utilizar los recursos	Facilita la competencia y el acceso a los mercados internacionales	Mejora en la comprensión entre ejecutivos de TI y otros ejecutivos
Mantener relaciones cercanas con los clientes y la comunidad	Mejora en la seguridad, disponibilidad e integridad de los procesos	Brinda una mayor satisfacción

6. CONCLUSIONES

Se puede evidenciar que es el Gobierno de TI en las PYMES un tema actualmente de interés debido a la necesidad actual de que tienen las mismas de cumplir con los marcos regulatorios y ser competitivos en el mercado. Así mismo, se identificó que dentro de los 18 artículos seleccionados se visualiza que solo 2 documentos están enfocados al desarrollo de un marco de gobierno TI en el área de desarrollo de software, no obstante, ninguno estaba enfocado a PYMES.

Para dar respuesta a la pregunta ¿Cuáles son las consideraciones que se deben tener en cuenta para desarrollar un modelo de gobierno TI en una PYMES del sector del software? se debe tener en cuenta que la adopción de modelo a elegir debe ir acompañada de un análisis riguroso, que contemple tanto los factores internos como los externos de la empresa además de las actividades de TI. Con el fin de identificar las adecuaciones que se deben realizar estructuralmente, para poder así hacer visibles las contribuciones y transformaciones que trae la implementación de gobierno TI para la PYMES entre los directivos.

Así mismo y considerando el resultado del mapeo sistemático realizado en este estudio, se resalta que el método propuesto por [34] se podría adaptar para implementarlo en una PYMES del sector del software. Debido a que este método permite identificar parámetros en un entorno real que permite limitar la selección de los estándares complementarios como ISO/IEC 38500 y COBIT facilitando la evaluación, dirección y monitoreo de los procesos de software basados en los requerimientos del gobierno TI para alinearlo a las necesidades del negocio.

Al mismo tiempo y considerando que las PYMES cuentan con bajos recursos tanto económicos como humanos, para un trabajo futuro se propone desarrollar un proceso de gobierno TI enfocado en la evaluación del capital estructura. Teniendo en cuenta que este, garantiza una relación efectiva entre las empresas y las TI además permite que el capital se explote y aproveche de manera adecuada para asegurar la competitividad, sostenible y la ventaja prolongada de PYMES en el mercado.

REFERENCIAS

- [1] Molano, J., Saavedra, E. y Villalobos, Y. (2014). Methodology integration between IT governance and balanced scorecard: Design based on companies in collection services. En Iberian Conference on Information Systems and Technologies. Lisboa, Portugal.
- [2] Hurtado, G. y Losada, B. (2013). Taxonomía de riesgos de outsourcing de software. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 21(1), 41-53.
- [3] De Haes, S. y Van Grembergen, W. (2009). Enterprise Governance of Information Technology in Enterprise Governance of Information Technology. Springer Science, 67, 21-75.
- [4] Salah, J. (2017). Modelo de Gobierno y Gestión de TI basado en la estrategia de Gestión del Riesgo para la Secretaría de Educación de Magdalena. Tesis de Maestría. Universidad del Norte.
- [5] Van Grembergen, W. y De Haes, S. (2009). Enterprise governance of information technology: Achieving strategic alignment and value. Springer Science, 79, 2-218.
- [6] Garbarino, H. (2014). Marco de Gobernanza de TI para empresas PyMEs – SMESITGF. Universidad Politécnica de Madrid.
- [7] Ayat, M. et al. (2011). Issues in implementing IT governance in Small and Medium Enterprises. En Second International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. Madrid, Spain.

- [8] Silva, H. et al. (2020). Information Technology Governance in Small and Medium Enterprises-a Systematic Mapping. *JISTEM- Journal of Information Systems and Technology Management*, 17, 189-198.
- [9] Marulanda, C., Trujillo, M. y Valencia, F. (2017). Gobierno y gestión de TI en las entidades públicas. *AD-minister*, 31, 75-92.
- [10] Vejar, L. (2014). El Gobierno TI es el único camino posible para asegurar que las áreas de sistemas contribuyen al éxito de las empresas. *Gobierno de tecnología de Información: Tópicos Selectos de Ingeniería*, 88, 29-38.
- [11] Alreemy, Z. Chang, V. Walters, R. y Wills, G. (2016). Critical success factors (CSFs) for information technology governance (ITG). *International Journal of Information Management*, 36(6), 907-916.
- [12] Ariza, P. et al. (2014). Implementation of MOPROSOFT level I and II in software development companies in the Colombian Caribbean, a commitment to the software product quality region. *Central America and Panama Convention*. Panamá.
- [13] Aversano, L., Grasso, C. y Tortorella, M. (2011). Evolving enterprise information system in Small and Medium enterprise: An opportunistic approach and a case study. En *Conference on Commerce and Enterprise Computing*. Los Angeles, USA.
- [14] Pérez, D. y Dressler, M. (2007). Tecnologías de la información para la gestión del conocimiento. *Ideas*, 3, 31-59.
- [15] Jimeno, K., Ariza, P. y Piñeres, M. (2017). Gobierno de TI en Pymes Colombianas. ¿Mito o Realidad? *Espacios*, 18, 34-42.
- [16] Monfort, R. (2016). COBIT 5 y el Cuadro de Mando Integral como herramientas de Gobierno de TI. *Disertación Doctoral*. UdeA.
- [17] Cordero, D. (2015). Mejores prácticas para implantar el gobierno de Tecnologías de la Información (TI), en la universidad ecuatoriana. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 2(3), 67-78.
- [18] ISACA. (2012). COBIT5 Implementation Spanish. ISACA.
- [19] ISACA. (2007). COBIT 4.1 Spanish. ISACA.
- [20] ICONTEC. (2018). NTC-ISO/IEC 38500. ICONTEC.
- [21] Velásquez, T., Puentes, A. y Pérez, Y. (2015). Model for implementation of IT corporate governance. *Tecnura*, 19, 159-169.
- [22] Van Bon, J. et al. (2008). *Fundamentos de ITIL*. McGraw Hill.
- [23] Carvalho, M., Batista M, y Coelho P. (2016). Governança e Gestão de Projetos de TI: Integração COBIT 5 e PMBOK. *Atas da Conferencia da Associacao Portuguesa de Sistemas de Informacao*, 16, 84-104.
- [24] Project Management Institute. (2013). *PMBOK @. 5*, 5. PMI.
- [25] Osorio, M. et al. (2020). Evaluating Open Government Data Programs: A Systematic Mapping Study. En *Seventh International Conference on eDemocracy & eGovernment*. Buenos Aires, Argentina.
- [26] Osorio, M. (2015). Diseño de un plan de gobernabilidad de datos de investigación para la Universidad Cooperativa de Colombia. *Universidad Pontificia Bolivariana*.
- [27] MINTIC. (2016). Guía para la Implementación de Seguridad de la Información en una MYPYME. 1.2. MinTIC.
- [28] Vogt, M. et al. (2011). Adapting IT Governance Frameworks using Domain Specific Requirements Methods: Examples from Small & Medium Enterprises and Emergency Management. *AMCIS*.
- [29] De Castro, M. y Hernandez, C. (2013). A metric of software size as a tool for IT governance. *ERn 27th Brazilian Symposium on Software Engineering*. Sao Paulo, Brasil.
- [30] Frogeri, R. et al. (2020). Governança de TI em PMEs: proposta de um modelo teórico sob uma ótica interdisciplinar. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, 27, 286-304.
- [31] Yamami, A. et al. (2018). A New Pattern for the Deployment of IT Governance Frameworks in Organizations. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4), 3459-3465.
- [32] Bergeron, F. et al. (2015). IT governance theories and the reality of SMEs: Bridging the gap. En *Hawaii International Conference on System Sciences*. USA.
- [33] Frogeri, R. et al. (2019). Como as Literaturas de Adoção de TI e de Governança de TI Estão Associadas para Gerar Valor aos Negócios: Reflexões no contexto de PMEs. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, 24(11), 363-378.
- [34] Nguyen, V. et al. (2017). Aligning Requirements-driven Software Processes with IT Governance. *ICSOFT*, 46, 338-345.
- [35] Tan, K., Yuen, Y. y Ha, L. (2018). Factors affecting knowledge governance implementation among Malaysian SMEs. *Management Science Letters*, 8(5), 405-416.
- [36] Lee, M. (2013). IT governance implementation framework in small and medium enterprise. *International Journal of Management and Enterprise Development*, 12(4-6), 425-441.
- [37] Levstek, A., Hovelja, T. y Pucihar, A. (2018). IT Governance Mechanisms and Contingency Factors: Towards an Adaptive IT Governance Model. *Organizacija*, 51(4), 286-310.
- [38] Silva, D., Da Silva, M. y Pereira, R. (2018). Baseline mechanisms for enterprise governance of IT in SMEs. *Business Informatics*, 2, 32-41.
- [39] Albayrak, A. y Gadatsch, A. (2012). It governance model for small and mediumsized enterprises. *Mediterranean and Middle En Eastern Conference on Information Systems*. San Diego, USA.
- [40] Khalil, S. y Belitski, M. (2020). Dynamic capabilities for firm performance under the information technology governance framework. *European Business Review*, 32(2), 129-157.
- [41] Raymond, L. et al. (2019). Determinants and outcomes of IT governance in manufacturing SMEs: A strategic. IT management perspective *International Journal of Accounting Information Systems*, 35, 1004-1022
- [42] Miyamoto M. y Kudo, S. (2013). Five domains of information technology governance in Japanese SMEs: An empirical study. En *International Conference on ICT Convergence*. New York, USA.

Estudio de la co-creación y la participación ciudadana en las plataformas emergentes para diseñar soluciones de innovación ante los retos de la pandemia Covid-19

Lizeth Fernanda Serrano Cárdenas¹

Yessika Lorena Vásquez González²

Laura Victoria Buitrago Álvarez³

Hugo Fernando Castro Silva³

¹Universidad Católica de Colombia

²Universidad Jorge Tadeo Lozano

³Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

En la actualidad, las sociedades deben prepararse para los cambios económicos, políticos, ambientales, sociales que se dan de manera inesperada. En este contexto, el principal reto para los gobiernos se encuentra en unir esfuerzos y trabajar de forma colaborativa con diversos actores a fin de responder oportunamente a las problemáticas y necesidades de la sociedad, para ello se requiere integrar herramientas tecnológicas y potencializar las capacidades de innovación de los actores involucrados en dichos cambios, entre ellos los ciudadanos. Incluir a la ciudadanía en la solución de retos públicos, implica generar espacios para que sus voces sean escuchadas y tenidas en cuenta en dichos asuntos. Debido a lo anterior, emergen nuevos mecanismos de participación ciudadana donde la co-creación es el enfoque para promover procesos de innovación pública. Así, los espacios virtuales de co-creación, se constituyen en plataformas para agilizar la frecuencia y la calidad de las interacciones implícitas en los procesos participativos que pretenden el logro de objetivos comunes en relación con soluciones de innovación, de allí que gobiernos de diferentes geografías hayan incrementado su implementación para dar respuesta a problemáticas públicas complejas como la que hoy enfrenta el mundo en la Pandemia COVID-19. A pesar de la relevancia de estos nuevos mecanismos soportados en la tecnología, es evidente que se requiere realizar un análisis de la forma en cómo allí se desarrollan los procesos de co-creación y participación, ya que, en aras de la innovación, podrían obviarse lógicas de generación de valor en doble vía, tanto para las instituciones públicas como para los ciudadanos; y, por el contrario, podrían terminar convirtiéndose en plataformas que actúen como canales informativos o como escenarios para publicar ideas. Dada esta necesidad, esta investigación se orientó al estudio de la co-creación y la participación ciudadana en plataformas emergentes de Innovación Pública en la Pandemia COVID-19. Este ejercicio se soportó en una revisión sistemática de literatura que relacionara los temas de co-creación y participación ciudadana en escenarios digitales, revisión que permitió la construcción de categorías de análisis para posteriormente, estudiar bajo la metodología de análisis de contenido web, tales procesos en cuatro plataformas.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy, el mundo está experimentando la expansión del Síndrome Respiratorio Agudo Severo-Coronavirus (SARS-CoV-2), declarado Pandemia por la Organización Mundial de la Salud [1]. Ante esta expansión, los últimos meses han hecho de 2020 uno de los años más desafiantes para la sociedad. La pandemia COVID-19 ha cambiado rápida y drásticamente la vida cotidiana de casi todos, y mantiene a más de la mitad de la población mundial encerrada [2]. La gravedad de esta crisis se constata al analizar las cifras, donde al 3 de julio de 2020, se han registrado a nivel global 10.906.822 casos confirmados y 522.122 muertes atribuidas directamente al COVID-19; en el caso de Colombia, se registran como confirmados, 102.261 casos y más de 3.650 muertes [3]. Si bien a lo largo de la historia, la humanidad ha enfrentado diversas pandemias, se ha planteado que la complejidad de la respuesta humana ante la enfermedad por coronavirus no tiene precedentes, llegando a considerarse que posterior a este complejo escenario *el mundo nunca volverá a ser el mismo* [4]. Ante esta crisis, como humanidad enfrentamos una transformación profunda, que ha demandado la reinención de múltiples sectores, entre ellos, el sector público, donde se requieren respuestas ágiles en términos, sociales, económicos y desde luego, de salud pública.

Sin embargo, de acuerdo con análisis realizados por la OECD y el Observatorio para la Innovación Pública OPSI junto con otros aliados [5], pocos gobiernos han estado preparados para enfrentar una crisis de esta naturaleza, y todos los gobiernos, de distintas partes del mundo están trabajando para lidiar con la pandemia y con las problemáticas emergentes a raíz de esta crisis. Según el informe, para lograrlo, deberán orientar sus esfuerzos para la innovación pública, alrededor de cinco temas relevantes y prioritarios: 1) aceleración rápida para la innovación y la transformación digital, con el particular reto de comprimir años de avances tecnológicos en pocas semanas y meses; 2) búsqueda de soluciones y conocimientos de abajo hacia arriba: asumiendo el reto de la construcción de nuevos canales para que las nuevas ideas y soluciones provenientes de los ciudadanos y otros actores se hagan realidad; 3) solidaridad social y cuidado: fundamentado en la autoactivación y movilización de millones de personas que están motivadas a ayudar a sus comunidades; 4) reducir la propagación del virus a través de su seguimiento y de la acción adaptativa: aquí el reto, se concentra en tomar acciones en relación con el rastreo de virus y el rastreo de su cadena de contagio para aplanar la curva y limitar su propagación; y, 5) forjar un camino hacia la recuperación: donde el reto es el diseño de estrategias y nuevas formas de encaminar las economías, a la vez que se apuesta por volver a imaginar cuál debería ser la nueva normalidad.

Los temas antes descritos, permiten evidenciar la importancia de las nuevas maneras de hacer las cosas, de descubrir nuevas verdades detrás de una realidad difusa y de entender las potencialidades y capacidades de las personas,

instituciones y organizaciones para actuar de manera colaborativa y hacer realidad la innovación pública. El concepto de innovación pública es emergente en las agendas gubernamentales y a pesar de la pluralidad en sus definiciones [6], podría entenderse como un proceso de aprendizaje [7] en el que los gobiernos intentan enfrentar los desafíos públicos de forma colaborativa generando valor para la sociedad [8]. Esta colaboración, demanda entonces la participación activa de diversos actores, entre ellos, los ciudadanos para la formulación de alternativas económicas, políticas y sociales [9]. En particular, en el contexto de crisis global, donde los gobiernos deben inspirar a la acción, compartir de forma ágil los aprendizajes y acelerar su potencial de innovación.

Para acelerar dichos procesos, se ha hecho cada vez más importante los servicios y procesos digitales, donde los gobiernos han tenido que implementar medidas innovadoras para, a través de estos mecanismos, cumplir con su misionalidad y acelerar el desarrollo de soluciones ante los retos públicos que hoy se enfrentan [5]. En estos escenarios, los gobiernos han reconocido que no tienen todas las respuestas, y, por tanto, han hecho de estos escenarios virtuales, nuevos mecanismos de co-creación y experimentación para permitir que los ciudadanos, las empresas y otros actores sociales aporten ideas y soluciones.

Estos nuevos mecanismos de participación ciudadana inciden en el desarrollo de la vida social [10] donde a través de estrategias conjuntas se busca generar valor público mediante equipos transdisciplinarios, donde la pluralidad de visiones facilite el diseño colaborativo de soluciones de transformación que incidan en lo público [11]. Estas nuevas plataformas se fundamentan en la integración de las tecnologías digitales, cuyas transformaciones están favoreciendo la ruptura de barreras de comunicación a nivel mundial. Ahora, la información se comparte en tiempo real e inmediato, dando paso a nuevas dinámicas de interacción entre la ciudadanía y las instituciones. Así, se evidencia el surgimiento de diversos canales y espacios digitales que pretenden generar dinámicas colaborativas entre actores del ecosistema de innovación para el desarrollo de soluciones en dimensiones económicas, sociales, políticas [12].

Dadas estas transformaciones en la relación ciudadanos-gobiernos, se ha hecho necesario, investigar estos nuevos espacios, estudiando cómo se desarrollan los procesos participativos y de co-creación en su interior. Esto, dado que múltiples plataformas continúan emergiendo ante lo impredecible de los retos públicos, donde se hace necesario que los esfuerzos se direccionen hacia el desarrollo de soluciones ágiles y colaborativas. Ejemplo de ello son las iniciativas generadas a nivel global a causa de una emergencia mundial sin precedentes, que volcaron los esfuerzos de las instituciones públicas a colaborar con múltiples sectores y con los ciudadanos, para generar conocimiento colectivo que permita diseñar soluciones co-creativas al reto público más relevante del siglo: la pandemia COVID-19 [13]. En particular, resulta pertinente la comprensión de tres elementos al interior de tales experiencias: qué se necesita para desarrollar dichos procesos de co-creación, qué motiva a las personas a trabajar de forma colaborativa, y finalmente, cuál es el valor que se genera de dichos procesos en relación con el ejercicio participativo de los ciudadanos [14,15].

Considerando lo antes expuesto, esta investigación, tiene como propósito analizar los procesos de participación ciudadana y co-creación en cuatro plataformas de innovación que se han implementado para dar soluciones a la Pandemia COVID-19. Con el objeto de identificar los aspectos clave a analizar, se realizó una revisión sistemática de literatura publicada en la base de datos multidisciplinar *Web of Science* sobre dichos temas, que permitió tanto el análisis descriptivo del campo de conocimiento, comprendiendo cómo estos temas se han estudiado a nivel global, así como la consolidación de un cuerpo teórico que facilita el análisis fundamentado en las plataformas objeto de estudio.

Los principales resultados de la investigación, afirmaron la creciente necesidad de contar con metodologías para analizar, evaluar y hacer seguimiento a los procesos de participación ciudadana ante nuevas iniciativas como las generadas por plataformas digitales de co-creación y pone en evidencia el interés creciente en este campo de estudio, resultado de la contingencia que experimentan los gobiernos a nivel mundial. Se espera que esta investigación genere dos aportes, facilitar un marco de referencia para analizar los procesos participativos en las plataformas de co-creación que se han implementado en agendas gubernamentales de distintas geografías y servir de referente de análisis sobre plataformas generadas en el contexto del reto público COVID-19 con el propósito de que tomadores de decisiones y académicos profundicen en su análisis y las usen como insumo en el diseño de soluciones, que requieren que múltiples actores colaboren en estas dinámicas de nueva normalidad que demandan las sociedades complejas.

2. MÉTODO

La estructura metodológica de la investigación se presenta en la Figura 1.



Figura 1. Estructura metodológica de la investigación

2.1 Fase 1: Revisión sistemática de literatura

La revisión de literatura es definida como la interpretación analítica de un conjunto de documentos publicados sobre un tema específico [16]. Así mismo, se considera que es un método sistemático y reproducible, el cual puede identificar, evaluar y sintetizar investigaciones en áreas específicas [12]. En esta investigación se siguió la propuesta metodológica de Tranfield, Denyer y Smart [17], compuesta de tres etapas:

- **Planificación:** En esta etapa, se delimitó la intención de la investigación y se identificaron las fuentes de información. Se establecieron los criterios de inclusión y exclusión de los estudios, definiendo como objeto de interés aquellos que permitieran definir, aclarar y analizar las tendencias investigativas asociadas a los tópicos de innovación pública, participación ciudadana y co-creación, materializados en plataformas digitales. La búsqueda fue realizada en la base de datos multidisciplinar *Web of Science*. Esta base de datos cuenta con una colección de más de 21,000 revistas académicas de alta calidad, revisadas por pares, publicadas en todo el mundo, en más de 250 disciplinas de ciencias, ciencias sociales y humanidades [18]. El análisis de la literatura de los artículos indexados en la base de datos *Web of Science*, fue complementado con documentos que se adicionaron a la base de análisis por bola de nieve, también se incorporaron otras fuentes como informes oficiales, teniendo en cuenta la relación de palabras y los propósitos de búsqueda establecidos.
- **Desarrollo:** Esta etapa se ejecutó en cinco momentos, que se presentan de forma gráfica en la Figura 2: 1) la construcción de la ecuación de búsqueda y su aplicación en la base de datos de *Web of Science*. Esta ecuación de búsqueda contenía palabras clave relacionadas con el objeto de análisis. La colección de palabras clave se deriva de ejercicios de revisión de literatura previos desarrollados por los autores. Se incluyeron todos los años disponibles (2004-2020 junio) en todos los idiomas. Producto de esta ecuación de búsqueda se identificaron 371 documentos. 2) El segundo paso, consistió en descargar la información bibliográfica de los documentos resultantes de la base de datos, esto, con el objetivo de realizar un análisis de la dinámica de publicación sobre el campo de conocimiento en una línea de tiempo y por países; para finalmente, y con apoyo del software de minería de datos VOSviewer®, realizar una revisión de la relación entre las palabras clave asociadas al campo de conocimiento, a través de un mapa de red, que reflejó las tendencias investigativas asociadas al objetivo de investigación. 3) En el tercer paso, se realizó un filtro leyendo los títulos de los documentos resultantes y priorizando aquellos que se orientaban de forma teórica o práctica al análisis de los conceptos de co-creación y participación ciudadana en el contexto de lo público y fundamentado en estrategias digitales, así se encontraron 110 que cumplían con dicho objetivo. 4) Posteriormente, se revisaron los resúmenes de los documentos antes seleccionados y se priorizó la revisión de 52 de ellos que demostraban una mejor alineación con los propósitos del estudio. 5) Por último, se realizó la lectura completa de los documentos seleccionados y se agregaron 22 documentos por bola de nieve, estos documentos, estaban sugeridos en la literatura y/o se encontraron en la etapa subsecuente de análisis de contenido web evidenciando una relación directa con los tópicos de investigación. La lectura de los documentos se realizó utilizando como apoyo el software de análisis cualitativo MAXQDA®.

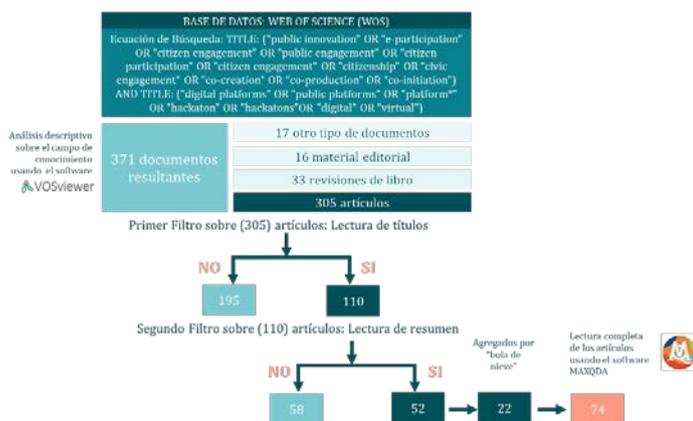


Figura 2. Desarrollo del proceso de revisión sistemática

- **Reporte de resultados:** El proceso de revisión sistemática facilitó el desarrollo del análisis descriptivo sobre el campo de conocimiento y la profundización teórica sobre los conceptos de co-creación y participación ciudadana en el contexto de la innovación pública. La teoría facilitó el análisis de las plataformas emergentes para la innovación pública en el contexto de la pandemia COVID-19, el resultado de este ejercicio se presenta en el siguiente apartado de este documento.

2.2 Fase 2: Análisis de contenido web

Holsti [19] define el análisis de contenido como una metodología para realizar inferencias a través de la identificación sistemática y objetiva de las características de un mensaje o texto [20, 21]. En este proceso, la inclusión o exclusión

de los contenidos a analizar se realiza de acuerdo con la aplicación de criterios consistentes de selección [22]. Los elementos más comunes que son objeto de análisis de contenido son: las palabras o términos, los temas, los actores, los párrafos, los ítems, los conceptos y la semántica [21, 23]. Esta metodología facilita el análisis de los textos dentro de su contexto [24], y ayuda a dar sentido a material cualitativo identificando su significado y su consistencia [25]. Algunos autores sugieren que el análisis de contenido debe extenderse a elementos distintos a los textos, cómo videos, discursos, imágenes y otros medios de comunicación [26, 27].

En coherencia con este planteamiento, Kim y Kuljis [28] exponen la necesidad de que los investigadores incluyan en sus análisis la información derivada de la Web y de las redes sociales. Esto, reconociendo que el contexto actual caracterizado por la facilidad de acceso a la información, por la emergencia de información y por la dificultad en seleccionar información relevante, supone a su vez una oportunidad para integrar esta información en el contexto investigativo. En particular, en esta investigación, se utilizó esta metodología para estudiar las páginas web de las plataformas emergentes de innovación pública para el diseño colaborativo con los ciudadanos de soluciones en relación con la pandemia COVID-19. Para este propósito, se analizaron aspectos clave que explican la co-creación y la participación ciudadana, aspectos que fueron provistos por la teoría previamente analizada en el proceso de revisión. Los resultados de dicho análisis se presentan en el siguiente apartado.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis descriptivo del campo de conocimiento sobre plataformas para la generación de innovación pública a través de la participación ciudadana y la co-creación

Al analizar la dinámica de publicaciones en el tiempo, se encuentran que el estudio de los procesos de co-creación y participación ciudadana en plataformas orientadas a la innovación pública es un tema emergente y de creciente interés en la comunidad investigativa (Figura 3), evidenciando un incremento sostenido a partir del año 2014 y mostrando que especialmente, para el año 2020 se esperaría que esta tendencia se mantenga. Uno de los artículos más citados sobre el tema fue publicado el año 2012, su enfoque se centra en las nuevas tendencias de gestión pública y el reto de su implementación bajo nuevos esquemas de gobernanza [29].

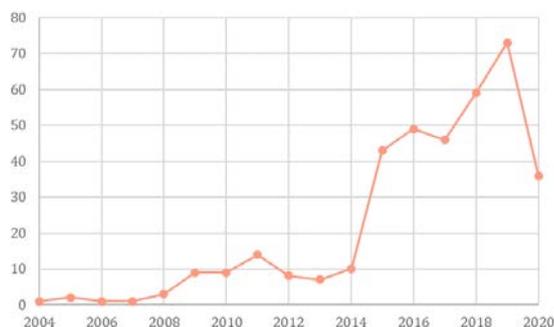


Figura 3. Dinámica de publicación en el tiempo sobre el campo de investigación

Otro de los documentos destacados se asocia al análisis de los desafíos futuros de la participación ciudadana, y el potencial que tiene para generar contribuciones en tres dimensiones: la gobernanza democrática: la eficacia, la legitimidad y la justicia social. Igualmente, se plantea que con las nuevas estrategias de inclusión tecnológica se generan nuevos caminos para las innovaciones participativas que desembocan en una gobernanza eficaz [30]. Por último, se resalta la investigación de [31], que analiza la relevancia de los procesos de co-creación con un enfoque de la innovación, reflexionando sobre la dinámica de los espacios virtuales de participación y planteando los retos para que estos se constituyan en escenarios que generen oportunidades en términos de verdadero impacto social.

Al analizar el interés que presentan los países para investigar acerca de las iniciativas de participación ciudadana y las plataformas de co-creación para materializar la innovación pública, se destacan las contribuciones de Estados Unidos al campo de conocimiento, seguido por Inglaterra y España. En Latinoamérica, resultan destacados los aportes de Brasil en producción académica sobre el tema, con publicaciones como la desarrollada por Dias y Cacho [32], quienes analizaron cómo los procesos de participación electrónica en gobiernos locales favorecerían el desarrollo de ciudades inteligentes; de forma práctica, estudiaron una plataforma específica encargada de recopilar y procesar información de Twitter para producir métricas relacionadas con la participación electrónica. Igualmente, se encontró interesante la publicación de Araújo, Penteado y Santos [33], quienes analizaron cómo el uso de la tecnología influye en el desarrollo de políticas públicas que integren las opiniones y demandas de la ciudadanía, para ello, estudiaron un índice de participación e influencia política que permitiera evaluar el activismo digital en la ciudad de Sao Paulo, concluyen, que la política se está transformando a través del uso de estos nuevos escenarios (Figura 4).

Por último, se estudió la relación entre palabras clave relevantes en la investigación sobre el campo de conocimiento, estas relaciones se visualizaron mediante el uso del software VOSviewer®. Las palabras que se representan en el

mapa fueron extraídas de los campos *palabras clave*, *título* y *resumen* de los artículos de la base de datos estudiada. Como resultado del proceso, se generó el mapa de relaciones mostrado en la Figura 5. En este mapa, se pueden evidenciar cuatro grupos principales de tendencias representados por colores diferentes: el clúster amarillo, está relacionado con la participación ciudadana, dónde se transforman las relaciones gobierno-ciudadanos; el clúster verde, concentrado en los ciudadanos, representa la importancia investigativa sobre el estudio de cómo los ciudadanos acceden a sus derechos a través de la participación y de cómo desde las nuevas plataformas tecnológicas facilitan el aporte de sus ideas; el clúster azul, enfatiza en la ciudadanía y al activismo digital, reflejando el interés en el estudio del desarrollo de nuevas habilidades y capacidades en la ciudadanía en relación con la era digital. Finalmente, el clúster rojo, evidencia que las tendencias sobre el campo, demuestran la importancia del estudio de la co-creación, y co-producción de conocimiento en comunidades virtuales, dónde tanto el análisis de las plataformas que soportan dichos procesos, cómo de las actitudes y comportamientos que motivan a los actores a participar se constituyen en enfoques investigativos preponderantes.

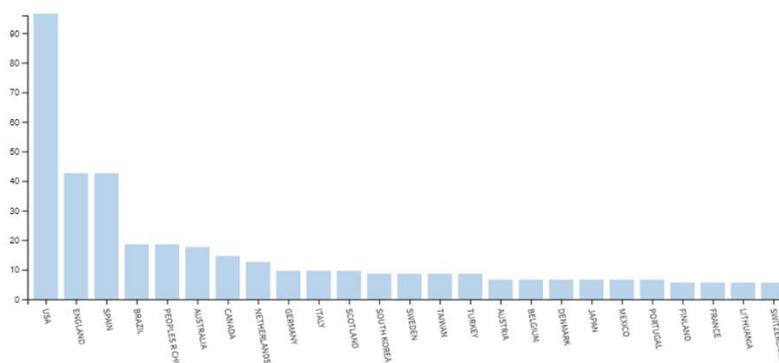


Figura 4. Dinámica de publicación por país sobre el campo de investigación

El análisis de tendencias permitió evidenciar que los nuevos mecanismos de participación ciudadana, y las nuevas plataformas de co-creación, son de interés tanto para los académicos como para los actores públicos que han querido llevar estas iniciativas a la práctica desde sus dinámicas de trabajo [34]. Para algunos autores, estos nuevos escenarios responden a las demandas de apertura de los gobiernos para la generación de soluciones ágiles, pertinentes y centradas en las demandas ciudadanas. Queda claro que la promoción de plataformas digitales, fundamentadas en marcos de gobierno abierto que implican ejercicios co-creativos con diversos actores, incluidos los ciudadanos, permite el diseño de soluciones de innovación pública que están transformando los esquemas de gobernanza tradicionales [35].

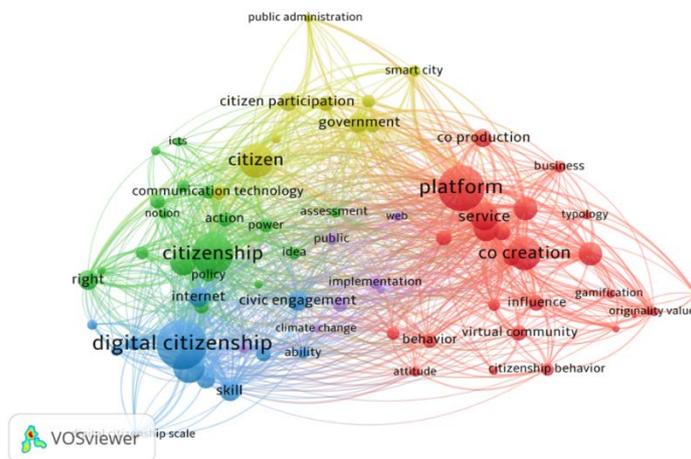


Figura 4. Tendencias sobre el campo de conocimiento evidenciadas en la relación de palabras clave

3.2 Plataformas emergentes para diseñar soluciones de innovación pública en la pandemia COVID-19

En las últimas décadas los espacios de participación ciudadana han cobrado protagonismo en gobiernos de diversos lugares del mundo [36, 37]. Lo anterior se encuentra inserto en el interés de promover esquemas de gobernanza abierta y colaborativa que fortalezcan la incidencia de los ciudadanos en los procesos de diseño, producción y entrega de servicios públicos y políticas públicas, en la toma de decisiones públicas y en la democracia [38]. En este marco se hace preciso profundizar en el desarrollo de procesos de co-creación, donde se le otorga especial relevancia a los procesos de participación ciudadana, en especial en escenarios digitales, donde la calidad de las interacciones debería dinamizar y acelerar el proceso de innovación. Estos espacios de co-creación, han tenido varias modificaciones, pasando de lo presencial a lo virtual y en particular, el uso de estas plataformas digitales ha sido evidente en los últimos meses de 2020, donde el mundo ha enfrentado a una situación de emergencia, que está retando a los

gobiernos a crear con celeridad mecanismos colaborativos que faciliten la generación de soluciones ante la Pandemia COVID-19. A continuación, se describen las plataformas para la innovación pública que se analizaron en el estudio:

3.2.1 Frena la curva FLC [39]

Es una plataforma ciudadana, que nace en España, con su lema *Juntos Somos Más Fuertes*, actualmente ha sido replicada de forma exitosa en 22 países a nivel mundial, los participantes de la iniciativa son: voluntarios, emprendedores, activistas, organizaciones sociales, *makers* y laboratorios de innovación pública y abierta. Los actores de esta iniciativa son instituciones públicas representadas, entre otras por el Laboratorio de Gobierno Abierto del Gobierno de Aragón [40], también se encuentran empresas de carácter privado, y universidades. El propósito de FRENA LA CURVA se centra en la cooperación con el fin de canalizar y organizar la energía social y la resiliencia cívica frente a la pandemia del COVID-19. Algunos de resultados de esta iniciativa, ha sido la generación más de 50 proyectos, la identificación de 140 desafíos comunes y 900 iniciativas ciudadanas. Para lograrlo, se han apoyado en escenarios virtuales propiciando espacios como Festivales de Innovación Abierta, co-laboratorios y laboratorios ciudadanos distribuidos. A través de su organización y coordinación, han establecido áreas priorizadas para desarrollar iniciativas: actividades para niños en la pandemia (educación y actividades, cuentos, manualidades, juegos), Aprender Entre vecinos (Recursos online, voluntariado y redes vecinales, aplicaciones), Trabajo, Cultura, información, Conexión y nuevas estrategias para el manejo efectivo de la información, entre otras.

3.2.2 #VENCEALVIRUS [41]

Es una iniciativa con enfoque local en Madrid, España. Fue liderada desde la Consejería de Ciencia, Universidades e Innovación de la Comunidad de Madrid [42] encargada de la coordinación y el control de la ejecución de las políticas del Gobierno en relación con las universidades y los sistemas de investigación científica e innovación tecnológica en el contexto digital. La iniciativa #VENCEALVIRUS tuvo como propósito que a través de la suma de capacidades de Universidades, Investigadores e Innovadores se generaran respuestas a los grandes retos del COVID-19. Se destaca la especial participación de la academia en esta iniciativa, con universidades como la Universidad de Alcalá, la Universidad Autónoma de Madrid, la Universidad Complutense de Madrid, entre otras soportando el proceso. Igualmente, se destaca dentro de la iniciativa la participación del Laboratorio Ciudadano MEDIALAB PRADO [43], cuya misionalidad ha estado orientada a la producción de proyectos culturales abiertos desarrollados de manera colaborativa buscando la consolidación de comunidades de aprendizaje. #VENCEALVIRUS, cuenta con tres áreas priorizadas: 1) Salud, buscando responder ¿Cómo podemos ayudar a paliar los efectos negativos de COVID-19 sobre las personas? 2) Comunidad, con el reto asociado a ¿Cómo podemos crear comunidad y cuidar a las personas ante epidemias o situaciones de aislamiento ahora y en los próximos meses? y 3) empleo y empresa, con el reto específico ¿Cómo podemos crear, mantener y mejorar el empleo y los negocios ante esta situación? ¿Podemos definir un nuevo marco de desempeño profesional más resiliente?

3.2.3 Cada día cuenta [44]

Se ha desarrollado en 18 países de América Latina, cuenta con más de 3600 participantes y ha generado como resultado más de 800 propuestas de solución ante la pandemia [45], desarrolladas a través hackáthones de 48 horas utilizando espacios y herramientas virtuales. Cuenta con el apoyo de organismos como el Banco Iberoamericano de Desarrollo BID a través de su Laboratorio. Igualmente, se han integrado organismos que articulan las instituciones públicas y privadas como Chile Marca País [46], presidido por el ministro de Relaciones Exteriores e integrado por 19 destacadas personalidades del sector público y privado. A la iniciativa se han sumado empresas del sector social como Yunus y Youth, orientada al fomento del emprendimiento social en jóvenes de distintos países con el apoyo de socios del sector privado y agencias de desarrollo internacional[47]; y redes como IMPACT HUB[48], orientada a la construcción de comunidades empresariales para lograr impacto en problemas sociales, y SOCIALAB[49], red orientada a *impulsar la creación de negocios sociales que se preocupan por construir un mundo en donde el entorno no limite a las personas y las oportunidades no sean un privilegio*. Las áreas priorizadas de intervención en el contexto de la pandemia por parte de la iniciativa son: inclusión social, alimentación, datos inteligentes, salud, educación, y empleo, entre otras.

3.2.4 Hackea la crisis 2020 [50]

Es una iniciativa liderada por la comunidad de *co-working* IMPAQTO [51], una empresa B de Ecuador, dedicada a trabajar con lo que denominan, agentes de cambio: emprendedores, *freelancers*, PYMES, corporativos e intraemprendedores, para construir un ecosistema sostenible para el planeta para las comunidades.

Así como la iniciativa CADA DÍA CUENTA, HACKEA LA CRISIS también está soportada en el apoyo del Banco Iberoamericano de Desarrollo a través del BIDLAB [52] el laboratorio de innovación del Grupo BID, dónde se tiene como propósito *la movilización de financiamiento, conocimiento y conexiones para catalizar innovación para la inclusión en América Latina y el Caribe*. Adicional a esta institución, Hackea la Crisis cuenta con el apoyo de empresas

privadas como Google y redes en el sector social como Impact Hub y Socialab. HACKEA LA CRISIS, se ha definido como *una serie de seis Hackáthones en línea, de libre acceso dónde se podrá trabajar junto a agentes de cambio de la región para la generación de soluciones para la crisis COVID-19* en seis áreas prioritarias: mujeres, población migrante, salud, educación, alimentos, emprendimientos y PYMES. Hasta el momento, han desarrollado dos de los seis hackáthones que se propusieron como meta.

El primero *hackathon* fue desarrollado en abril 2020 y se denominó, HACKEA LA CRISIS Mujeres y niñas [53], orientada a generar soluciones en tres áreas prioritarias: 1) Aumento en casos de violencia intrafamiliar bajo encierro, con el reto específico de construir soluciones para poblaciones rurales y urbanas que visibilice el aumento de violencia intrafamiliar que afecta a mujeres y niñas de la región durante la cuarentena, así como iniciativas de fomento a una cultura ciudadana de cero tolerancia a la violencia intrafamiliar, 2) Falta de acceso a productos y servicios: con el reto de encontrar soluciones ágiles y efectivas que faciliten el acceso a productos y servicios para mujeres y niñas, como información correcta, atención psicosocial y atención médica oportuna; y finalmente, 3) Imposibilidad de comunicación con el exterior, haciendo referencia a cómo las circunstancias actuales dificultan la posibilidad de denunciar o pedir ayuda por parte de las mujeres y niñas, en este contexto se aborda el reto de generar soluciones que respondan a la dificultad que tienen mujeres y niñas tanto para pedir como recibir ayuda y protección.

El segundo *hackathon* se denominó HACKEA LA CRISIS Migrantes [54], fue desarrollado en mayo de 2020, para dar respuesta a tres retos: 1) Integración económica: respondiendo a ¿Cómo construir soluciones que generen nuevas oportunidades que integren a las poblaciones en situación de movilidad a los sistemas económicos de los países receptores, beneficiando también a la población local? 2) Situación de calle, con el reto ¿Cómo imaginar soluciones prácticas que permitan a las poblaciones en situación de movilidad guardar cuarentena y trabajar en espacios que garanticen su seguridad y reduzcan las posibilidades de contagio? y 3) Xenofobia y discriminación, reto resultante de la problemática identificada en relación con que la pandemia ha incrementado la xenofobia y el temor de los migrantes a ser deportados y denunciados al buscar asistencia médica, que se traduce en un factor de riesgo para la propagación del virus. Así, este último reto estaba asociado con responder ¿Cómo desarrollar soluciones innovadoras que mejoren la respuesta colectiva al COVID-19 al incrementar el acceso a salud para la población en situación de movilidad, libre de xenofobia y discriminación?

El tercer *hackathon* se desarrollará en julio 2020, se denomina HACKEA LA CRISIS Arte Vs COVID 19 [55], y está enfocado en tres áreas: 1) Mitos y verdades, con el reto de generar piezas que difundan información de fuentes reales e incentiven a la población a validar cualquier información que reciban en fuentes fidedignas con información científica y comprobada; 2) Solidaridad, con el reto de generar piezas artísticas que inspiren a la solidaridad, al mejor uso de recursos para generar apoyo colectivo e inspirar a los ciudadanos a ser parte de la construcción de economías y comunidades más solidarias; y por último, 3) Salud mental y bienestar, asumiendo el reto de desarrollar piezas artísticas que inviten a pensar en el autocuidado y la salud mental.

3.3 La co-creación y la participación ciudadana en las plataformas de innovación pública para enfrentar el COVID-19

Desde la literatura de participación ciudadana se hace evidente que, a través de este proceso, los ciudadanos comparten sus preocupaciones y visiones sobre temas que son para ellos prioritarios, y si la participación es amplia y efectiva, se articulan demandas colectivas que favorecen el desarrollo de soluciones de política pública y servicios públicos fundamentados en la empatía, el interés y la confianza social [56]. Dada la relevancia de los espacios participativos en los procesos de gobierno, así como la aceleración en la dinámica de transformación de las sociedades, se ha hecho necesario que los mecanismos tradicionales de participación creados por los gobiernos se flexibilicen hacia escenarios donde las soluciones colectivas se construyan de forma más ágil y con la participación de más ciudadanos, para ello, se han promovido desde diferentes países, la creación de plataformas digitales para utilizar la inteligencia colectiva en el diseño de soluciones ante los retos impuestos por la Pandemia COVID-19. Lograr una participación ciudadana efectiva implica procesos de difusión y convocatoria adecuados.

Al analizar cómo se han desarrollado dichos procesos en las plataformas se encontró que en general, es predominante el uso de redes sociales como Facebook, Twitter e Instagram para los procesos de convocatoria. Una vez consolidados los equipos de trabajo, en los procesos de comunicación entre los ciudadanos y los mentores, predomina el uso de Whatsapp y Telegram, este último, usado con mayor énfasis en FRENA LA CURVA, dónde también implementaron un mecanismo de Foro Público dónde se comparten ideas y se generan comentarios sobre las ideas de otros. En #VENCEALVIRUS utilizan como canal de comunicación Mattermost, un servicio de chat en línea para el intercambio de archivos, y se soportan en la plataforma TAIGA, especialmente diseñada para la gestión ágil de proyectos. Al respecto, resulta interesante analizar los mecanismos de gestión y transferencia de conocimiento que las cuatro iniciativas han desarrollado, en particular, se resalta la apertura al público de la totalidad de las soluciones resultantes que se encuentra en los repositorios de CADA DÍA CUENTA y FRENA LA CURVA, dónde cuenta con acceso al detalle de los proyectos e iniciativas formuladas por los ciudadanos. Las ideas, soluciones y proyectos generados en las plataformas, están publicados bajo licencias abiertas. En el caso de FRENA LA CURVA, la información está publicada

bajo la licencia Creative Commons 2.0, es decir, que los interesados son libres de *Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, adaptar, remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente* [57]. En términos simples, según lo publicado por #VENCEALVIRUS, *las ideas son vuestras y de nadie más. Cuando termine este experimento podrás exportar tu proyecto y llevártelo contigo e incluso seguir trabajando en otra instancia de la herramienta. Podemos hacerlo en parte porque usamos código abierto.*

En la literatura revisada se evidencia cómo el concepto de co-creación ha estado estrechamente relacionado con dichos enfoques abiertos para la innovación, con el diseño participativo, el co-diseño, la gobernanza colaborativa y, por ende, con la participación ciudadana [58], elementos que en conjunto se han considerado los factores determinantes para el desarrollo de procesos de innovación pública [59]. En el contexto, de los retos públicos, la co-creación se entiende como un esfuerzo colaborativo donde múltiples actores desarrollan soluciones o nuevas prácticas que de forma tradicional hubiesen sido el resultado de procesos *top-down* [60].

Para facilitar la comprensión del concepto en el sector público, Torfing y Røiseland [61], lo definen como un proceso mediante el cual dos o más actores (públicos, privados, del sector social y/o ciudadanos) intentan resolver un problema, desafío o tarea compartida a través de un intercambio constructivo de diferentes tipos de conocimiento, recursos, competencias e ideas que mejoran la producción de valor público en términos de visiones, planes, políticas, estrategias, marcos regulatorios o servicios. Ya sea, a través de una mejora continua de dichos productos, servicios o resultados o mediante una innovación que paso a paso transforma la comprensión del problema o la tarea en cuestión y conduce a nuevas formas de resolverlo. Desde esta definición, se estudiaron las plataformas antes descritas, esto, dado que han sido concebidas como espacios de participación e involucramiento activo de los ciudadanos a fin de co-crear junto con otros actores públicos, privados y del sector social soluciones a los retos emergentes en la Pandemia COVID-19. Cada una de estas plataformas ha ido construyendo sus propias dinámicas de trabajo, generando características propias, específicas y coherentes con su objetivo.

Se evidencia que en las plataformas el proceso de co-creación con los ciudadanos se ha desarrollado a través de la modalidad *hackathon* en línea. El *Hackathon*, como mecanismo, se ha considerado un fenómeno emergente en el contexto de la innovación digital liderada por el sector público, según Briscoe y Mulligan [62], este fenómeno está transformando los procesos participativos de los ciudadanos, pasando de entenderlos como voluntariados, a identificarlos como procesos donde la participación genera a los ciudadanos algún tipo de beneficio. Estos beneficios están usualmente asociados a la entrega de premios financiados por entidades patrocinadoras de la iniciativa, o procesos de formación y transferencia de conocimiento en herramientas y metodologías de vanguardia que facilitan abordar retos complejos desde enfoques de innovación. Según los autores, se ha identificado que la provisión de estos incentivos, que también se asocian con oportunidades de financiación o acompañamiento especializado para que los ciudadanos materialicen sus ideas como emprendimientos de carácter social, genera en los ciudadanos que participan en estos espacios, lógicas competitivas que aceleran y mejoran los resultados del proceso de innovación.

En el caso de FRENA LA CURVA, aunque no se denominó *hackathon*, el proceso siguió dinámicas similares a las antes descritas en el trabajo desarrollado en los denominados *Laboratorios Distribuidos*, entendidos como mecanismos que promueven la experimentación, la colaboración y la innovación ciudadana para afrontar la situación de emergencia producida por el COVID-19. Allí, se conformaron equipos multidisciplinares que, desde el día 19 de marzo hasta el día 23 de marzo trabajaron de forma colaborativa para desarrollar un primer prototipo de propuestas ante estos retos, siguiendo cuatro fases: 1) convocatoria de proyectos, 2) creación de equipos, 3) desarrollo colaborativo, y 4) compartir resultados, enfatizando en los requerimientos para la continuidad e implementación del proyecto. Las fases antes descritas son similares a las desarrolladas por las otras tres iniciativas, con la diferencia que en FRENA LA CURVA, se implementaron en un mayor tiempo del usual en estos escenarios de *hackathon*, 5 días en lugar de 24 o 48 horas, esto se explica en que más que la generación de ideas, se estaba promoviendo la consolidación de proyectos, implicando así un mayor alcance.

Se evidenció entonces que el desarrollo metodológico para la co-creación es similar en las cuatro iniciativas estudiadas, con algunas variaciones en el número de etapas, en la profundidad dada a las mismas y en las áreas priorizadas. Para HACKEA LA CRISIS, el proceso es de tres etapas: 1) Presentamos retos en las áreas priorizadas, 2) Trabajamos por equipos, de 3 a 5 personas y 3) Presentamos Soluciones. Por su parte, en CADA DÍA CUENTA, el proceso se ha dado en cinco fases: 1) Sube tu reto, 2) Selección de mejores retos, 3) Anuncio de equipos, donde el Hackathon comienza, 4) el *Hackathon* Termina, y 5) Las ideas se implementan. Se destaca de esta plataforma que la priorización de los retos a abordar estaba bajo el liderazgo de los ciudadanos a través de sus propuestas iniciales, mientras que, en las demás plataformas, se contaba con áreas de actuación más específicas.

Finalmente, en #VENCEALVIRUS, el desarrollo metodológico de su proceso, se ha desarrollado en cinco pasos: 1) Involucrar la experiencia y conocimiento de científicos, universitarios, profesionales innovadores y sociedad civil en general, 2) Generar ideas y convertirlas en propuestas tangibles, 3) poner en marcha soluciones rápidas y creativas ante los retos generados por el COVID-19, 4) dar un impulso especial a algunas de las ideas con alto potencial de desarrollo que puedan recibir el respaldo de organizaciones potentes, y 5) abrir un espacio de comunicación y de

trabajo sostenible en el tiempo donde todos los proyectos pueden seguir creciendo. De lo anterior, se concluye que las plataformas cuentan con procesos de co-creación similares y que los ciudadanos son el centro del mismo.

Complementario a lo anterior, se encontró que el proceso de co-creación requiere de la movilización de redes de actores, tanto públicos como privados y ciudadanos, para diseñar soluciones que sean implementadas de forma efectiva y sostenible [63]. En las cuatro plataformas analizadas, se identificó que, dentro del proceso, la fase final de implementación de las propuestas, proyectos o soluciones que surgieron en estos espacios, queda bajo el liderazgo de los ciudadanos. Las plataformas proveen una metodología, unas herramientas particulares, un acompañamiento de mentores y expertos y unos medios digitales, para generar ideas ante unos retos definidos y posteriormente hacer que estas ideas se consoliden como prototipos.

Para lograrlo, cuentan con equipos de mentores, en su mayoría, miembros de las entidades aliadas que patrocinan las iniciativas y otros ciudadanos voluntarios con experiencia en las metodologías usadas para la generación de ideas, la priorización de las mismas y el diseño colaborativo de prototipos facilitando el proceso de discusión sobre su pertinencia con posibles usuarios de las soluciones. Sin embargo, trasladar estas ideas a la práctica, es una tarea que se espera, los ciudadanos desarrollen.

Para este propósito, las plataformas, se comprometen a identificar posibles aliados en sus redes colaboración y realizar un acompañamiento a las iniciativas que decidan continuar su interés en implementarse. Esto se validó de forma explícita en la página de FRENALACURVA, donde mencionan que, *desde FRENALACURVA no se ofrecen recursos económicos ni materiales para el desarrollo del proyecto. En cada caso, se valorará la manera de conectar el proyecto con potenciales colaboradora/es*. En #VENCEALVIRUS, por ejemplo, seleccionaron 15 proyectos para *continuar trabajando con un programa de acompañamiento enfocado a una presentación virtual a la que invitaremos a Instituciones, Fundaciones y Empresas, para que puedan colaborar y tomar el testigo de los proyectos en los que vean que pueden colaborar* [64]. De forma similar en HACKEA LA CRISIS, mujeres y niñas promueven como beneficio de la participación que *los proyectos destacados recibirán acompañamiento para ejecutarse en los próximos días, así que tus ideas, de ser de las más sobresalientes y accionables podrán volverse realidad*.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación generó un marco de referencia para analizar los procesos participativos y de co-creación en plataformas digitales, a la vez que visibilizó iniciativas con dichos enfoques en el contexto del reto público más relevante que ha enfrentado la humanidad en los últimos tiempos, la Pandemia COVID-19, esto, con el propósito de que tomadores de decisiones y académicos profundicen en su análisis y las usen como insumo en el diseño de nuevos escenarios para abordar de forma colaborativa retos públicos complejos. El estudio se soportó en un ejercicio riguroso de revisión sistemática de literatura que relacionó los temas de co-creación y participación ciudadana en plataformas digitales para la innovación pública. Al analizar el campo de conocimiento, se evidencia el creciente interés académico en la comprensión de cómo estas plataformas pueden transformarse en canales poderosos para acercar a las instituciones públicas a las demandas de los ciudadanos, se evidenció que en Latinoamérica aún se requiere continuar documentado desde una perspectiva rigurosa estos procesos, para que se visibilicen en entornos científicos las lecciones aprendidas en los países de la región y se constituyan así en insumo para acelerar los procesos de aprendizaje en geografías con retos públicos similares.

La revisión sistemática de literatura permitió identificar referentes teóricos para analizar bajo la metodología de análisis de contenido web, la co-creación y la participación ciudadana en cuatro plataformas emergentes en la Pandemia COVID-19: FRENALACURVA, #VENCEALVIRUS, CADA DÍA CUENTA y HACKEA LA CRISIS 2020. El análisis permitió validar que las redes sociales son los principales canales de comunicación entre los ciudadanos y los actores que promueven dichas plataformas. Esto genera ventajas en términos de proximidad y agilidad en las interacciones, pero a la vez, genera preocupación, en cuanto; evidencia que aquellos ciudadanos en países, como Colombia, donde aún se presentan brechas de acceso a internet, tienen limitaciones para que sus voces sean consideradas en estos espacios. Paradójicamente, podrían ser estas las voces con mayor necesidad de considerarse en el diseño de las soluciones frente a la Pandemia y otros retos públicos.

Desde otra perspectiva, se evidenció que las plataformas coinciden el desarrollo de procesos de co-creación bajo la metodología *hackathon*, que usualmente, parte de una convocatoria abierta divulgada en las redes sociales de las organizaciones aliadas de la iniciativa, como Facebook, Twitter e Instagram; seguido de una sesión de ideación y construcción de prototipos de las ideas, y para finalizar, una etapa donde a través de mecanismos como videos y presentaciones se divulga, en las plataformas los resultados de las ideas, proyectos o soluciones resultantes del proceso. Esta metodología se desarrolla en tiempos cortos (de 24 horas a 5 días), permite la generación ágil de soluciones y está transformando los incentivos para la participación ciudadana, que van desde premios hasta oportunidades para financiar los proyectos que generen en estos escenarios. Su carácter abierto hace que los procesos de innovación generados en las plataformas se constituyan en insumo para el desarrollo de soluciones para la Pandemia COVID-19 en múltiples geografías, más allá de los límites de alcance definidos por las plataformas.

Pese a las ventajas antes expuestas, generadas en los procesos de co-creación y participación ciudadana promovidos desde estas plataformas, se identificaron algunos retos asociados a dichos procesos. Primero, si bien el rol del ciudadano es fundamental en el proceso de co-creación acelerado en las plataformas, estas coinciden en que la implementación de las iniciativas debe promoverse desde los ciudadanos, limitando su rol a identificar posibles aliados que con conocimiento especializado y con redes sólidas favorezcan la implementación de las soluciones.

Sin embargo, dado que lo abordado por las iniciativas, en su mayoría corresponde a retos públicos como salud, educación, empleo, migración, brechas de género, entre otros, resultaría interesante, a la vez que imprescindible, un rol más activo de las instituciones públicas presentes en las iniciativas para articular las instituciones del sector público con las iniciativas ciudadanas haciendo que a través de los ecosistemas, estos proyectos se transformen de ideas a soluciones con un mayor impacto y escalabilidad. Por último, se encuentra que, si bien en las plataformas se promueven la participación ciudadana desde instituciones públicas, laboratorios públicos y/o laboratorios ciudadanos, y organismos como BID LAB, en el caso de Latinoamérica, el fin más allá de generar soluciones de innovación pública, es la generación de ejercicios de innovación social, dónde los ciudadanos entre sí se organizan, crean y proponen iniciativas innovadoras ante la crisis. Pero, podría considerarse que aún no se han generado resultados que pudiesen conceptualizarse como innovación pública, dado que a pesar que se cuenta al interior de estos escenarios con la participación de múltiples actores, entre ellos el gobierno y los ciudadanos, estos no colaboran de forma directa para desarrollar soluciones de innovación.

Dado lo anterior, se sugiere que futuras investigaciones orienten sus esfuerzos a analizar en detalle, desde las voces de los actores participantes en las iniciativas, los retos que suponen los procesos de materialización de ideas y de articulación de los ecosistemas de innovación de los países. En consecuencia, es preciso favorecer que tales escenarios participativos pasen de ser repositorios de ideas de los ciudadanos, o proyectos de emprendimiento que se replican en diversos territorios como iniciativas individuales, a proyectos de innovación pública donde el poder y el liderazgo de los mismos, esté distribuido entre los actores, y dónde la pluralidad de los mismos haga de los procesos de co-creación escenarios ágiles, centrados en las personas, pero a su vez, contextualizados en las prioridades, capacidad y agenda de las instituciones públicas.

REFERENCIAS

- [1] Guest, J., del Rio, C. y Sánchez, T. (2020). The three steps needed to end the COVID-19 pandemic: bold public health leadership, rapid innovations, and courageous political will. *JMIR Public health and surveillance*, 6(2), e19043.
- [2] Sandford, A. (2020). Coronavirus: Half of humanity now on lockdown as 90 countries call for confinement. Recuperado: <https://www.euronews.com/2020/04/02/coronavirus-in-europe-spain-s-death-toll-hits-10-000-after-record-950-new-deaths-in-24-hou>.
- [3] Johns Hopkins. (2020). COVID-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE). Recuperado: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>.
- [4] Matias, T., Dominski, F. y Marks, D. (2020). Human needs in COVID-19 isolation. *Journal of Health Psychology*, 25(7) 871-882.
- [5] Global Trends. (2020). Embracing Innovation in Government: Innovative Responses to the COVID-19 crisis. Recuperado: <https://trends.oecd-opsi.org/trend-reports/innovative-covid-19-solutions/#rapid-acceleration-of-digital-innovation-and-transformation>.
- [6] Serrano, L. et al. (2019). Public Innovation: Concept and Future Research Agenda. En Uden, L., Ting, I y Corchado, J. (Eds.), *Knowledge Management in Organizations*. KMO 2019. Springer.
- [7] Bekkers, V., Edelenbos, J. y Steijn, B. (2011). An innovative public sector? Embarking on the innovation journey. Palgrave.
- [8] Bason, C. (2018). *Leading Public Sector Innovation 2E: Co-creating for a Better Society*. Policy press.
- [9] Aranguren, L. (2005). La Participación Ciudadana: Posibilidades y Retos. *Revista de Ciencias Sociales*, 22, 1-23.
- [10] Angeli, L., Delfino, G. y Zubietta, E. (2016). Participación ciudadana en la era digital. *Modalities and Associated*.
- [11] Vercelli, A. (2013). La participación ciudadana en la era digital. *Análisis de las tecnologías digitales que se utilizan para la gestión de derechos ciudadanos*. *Virtualis*, 4(7), 115-129.
- [12] Onwuegbuzie, A., Bustamante, R. y Nelson, J. (2010). Mixed research as a tool for developing quantitative instruments. *Journal of mixed methods research*, 4(1), 56-78.
- [13] Ministerio de Salud y Protección Social. (2020). Abecé Nuevo Coronavirus (Covid-19). MinSalud, 1-5. Recuperado: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ET/abece-coronavirus.pdf>.
- [14] Mačiulienė, M. y Skaržauskienė, A. (2016). Evaluation of co-creation perspective in networked collaboration platforms. *Journal of Business research*, 69(11), 4826-4830.
- [15] Gouillart, F. (2012). Co-Creation: The Real Social-Media Revolution. *Harvard Business Review*, 56, 2-5.
- [16] Fink, A. (2019). *Conducting research literatura reviews: From the internet to paper*. Sage publications.
- [17] Tranfield, D., Denyer, D. y Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British journal of management*, 14(3), 207-222.
- [18] Web of Science. (2019). Colección principal de Web of Science. Recuperado: <http://clarivate.libguides.com/webofscienceplatform/woscc>.
- [19] Holsti, R., et al. (2018). *Content analysis. The handbook of social psychology*. Elsevier.
- [20] Weber, R. (1990). *Basic content analysis*. Sage Publications.
- [21] Berelson, B. (1952). *Content Analysis in Communication Research*. Free Press.
- [22] Stone, P. et al. (1968). The general inquirer: A computer approach to content analysis. *Journal of Regional Science*, 8(1), 113-116.

- [23] Merton, R. (1968). *Social Theory and Social Structure*. Free Press.
- [24] Mayring, P. (2002). Qualitative content analysis. *Forum Qualitative Social Research*, 1(2), 105-114.
- [25] Patton, M. (2002). *Qualitative research & Evaluation Methods*. Sage Publications.
- [26] Neuman, W. (2006). *Social research methods: Quantitative and Qualitative Approaches*. Pearson.
- [27] Macnamara, J. (2005). Media content analysis: Its uses, benefits and best practice methodology. *Asia Pacific Public Relations Journal*, 6(1), 1-34.
- [28] Kim, I. Y. y Kuljis, J. (2010). Applying content analysis to Web based content. En 32nd International Conference on Information Technology Interfaces. Cavtat, Dubrovnik.
- [29] Ramaswamy, V. y Ozcan, K. (2017). What is co-creation? An interactional creation framework and its implications for value creation. Pearson.
- [30] Bonina, C. (2015). Cocreación, innovación y datos abiertos. *Iniciativa Latinoamericana por los Datos Abiertos*.
- [31] Issa, A. et al. (2018). Open Innovation in the Workplace: Future work lab as a living lab. *Procedia*, 72, 629-634.
- [32] Dias, C. y Cacho, A. (2018). A Platform for Measuring e-Participation in Smart Cities: A Case Study with Brazilian Capitals. *IEEE Latin America Transactions*, 16(2), 542-548.
- [33] Araújo, R., Penteadó, C. y Santos, M. (2015). Digital democracy and experiences in e-participation: Internet activism and public policy. *História, Ciências, Saúde-Manguinhos*, 22, 1597-1619.
- [34] Voorberg, W. et al. (2017). A Systematic Review of Co-Creation and Co-Production: Embarking on the social innovation journey co-creation and co-production Embarking on the social. *Public Management Review*, 17(9), 1333-1357.
- [35] Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación. (2020). Invitación a presentar proyectos que contribuyan a la solución de problemáticas actuales de salud relacionadas con la pandemia de COVID-19. Recuperado: <https://minciencias.gov.co/convocatorias/invitacion-para-presentacion-propuestas/invitacion-presentar-proyectos-que-contribuyan>.
- [36] Fung, A. y Wright E. (2003). *Deepening Democracy: Institutional Innovations in Empowered Participatory Governance*. Ed. Verso.
- [37] Recon Colombia. (2020). Colombia Soluciona. Recuperado: <https://www.colombiasolucion.org/>.
- [38] Pogrebinschi, T. y Ryan, M. (2017). Moving beyond input legitimacy: When do democratic innovations affect policy making? *European Journal of Political Research*, 57(1), 135-152.
- [39] Creative Commons. (2020). Frena La Curva. Juntos Somos Más Fuertes. Recuperado: <https://frenalacurva.net/conocenos-frena-la-curva/>.
- [40] Laboratorio de Gobierno Abierto. (2020). Laboratorio de Aragón [Gobierno] Abierto. Recuperado: <http://www.laaab.es/>.
- [41] Consejería de Ciencia. (2020). Hackathon Virtual. Una Respuesta al Covid-19. Recuperado: vencealvirus.org.
- [42] Madrid, C. (2019). Consejería de Ciencia, Universidades e Innovación. Recuperado: www.comunidad.madrid/transparencia/unidad-organizativa-responsable/consejeria-ciencia-universidades-e-innovacion.
- [43] Gobierno de Cultura y Deportes del Ayuntamiento de Madrid. (2020). MediaLab Prado. Recuperado: <https://www.medialab-prado.es/medialab#block-medialab-theme-content>.
- [44] Socialab. (2020). Cada Día Cuenta Latam Hackaton Soluciones Para El Covid-19. Recuperado: <https://cadadiacuenta.org/>.
- [45] Socialab. (2020). Cada Día Cuenta Latam Hackathon. Recuperado: <https://socialabglobal.socialab.com/challenges/cadadiacuenta>.
- [46] Fundación Imagen de Chile. (2020). Chile Marca País. Recuperado: <https://marcachile.cl/web/fundacion-directorio.html>.
- [47] Y&Y. (2020). Yunus & Youth. Recuperado: <https://yunusandyouth.com/about/>.
- [48] Company, I. (2020). Impact Hub. Global Community. Recuperado: <https://impacthub.net/>.
- [49] Socialab. (2020). SocialLAB. Recuperado: <https://socialab.com/about/>.
- [50] Impaqto.net. (2020). Hacked La Crisis 2020. Recuperado: <https://www.hackealacrisis.net/>.
- [51] IMPAQTO. (2020). Comunidad Virtual IMPAQTO. Recuperado: <https://www.impaqto.net/>.
- [52] Banco Interamericano de Desarrollo. (2020). BID |LAB. Recuperado: <https://bidlab.org/es>.
- [53] Impaqto.net. (2020). Hacked La Crisis Mujeres + Niñas. Recuperado: <https://www.hackealacrisis.net/mujeres-2020>.
- [54] Impaqto.net. (2020). Hacked La Crisis Migrantes. Recuperado: <https://www.hackealacrisis.net/Migrantes-2020>.
- [55] Impaqto.net. (2020). Hacked La Crisis Arte Vs COVID 19. Recuperado: <https://www.hackealacrisis.net/hacked-la-crisis-arte-vs-covid19>.
- [56] Velásquez C., González, R. y Fundación Corona. (2003). Qué ha pasado con la participación ciudadana en Colombia? 455.
- [57] Creative Commons Global Network. (2020). Creative Commons. Recuperado: <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.es>.
- [58] Voorberg, W., Bekkers, V. y Tummers, L. (2015). A systematic review of co-creation and co-production: Embarking on the social innovation journey. *Public Management Review*, 17(9), 1333-1357.
- [59] Bason, C. (2018). *Leading Public Sector Innovation 2E: Co-creating for a Better Society*. Policy press.
- [60] Guillard, F. y Hallett, T. (2015). Co-creation in government. *Stanford Social Innovation Review*, 13, 40-7.
- [61] Torfing, J., Sørensen, E. y Røiseland, A. (2019). Transforming the public sector into an arena for co-creation: Barriers, drivers, benefits, and ways forward. *Administration & Society*, 51(5), 795-825.
- [62] Briscoe, G. y Mulligan, C. (2014). Digital Innovation: The hackathon phenomenon. *Creativeworks London Working Paper* 6.
- [63] McGann, M., Blomkamp, E. y Lewis, J. (2018). The rise of public sector innovation labs: Experiments in design thinking for policy. *Policy Sciences*, 51(3), 249-267.
- [64] Consejería de Ciencia. (2020). ¿Cómo será el proceso? Recuperado: <https://vencealvirus.org/7/>.

Efecto de los campos magnéticos y eléctricos sobre la membrana plasmática de las células individuales: Un enfoque computacional

Juan Felipe Escobar H.¹

Juan Jairo Vaca-González²

Johana María Guevara³

Diego Alexander Garzón-Alvarado⁴

¹Fundación Universitaria los Libertadores

²Fundación Universitaria del Área Andina

³Pontificia Universidad Javeriana

⁴Universidad Nacional de Colombia
Colombia

La membrana celular es una bicapa lipídica que permite el flujo de iones a través de sus proteínas de bombeo iónico. El flujo iónico puede estimularse con estímulos externos para activar vías de señalización específicas intracelularmente. Aunque los estudios han aplicado estímulos eléctricos y magnéticos para modificar la función celular, se desconocen los parámetros para estimular la membrana celular. En consecuencia, se desarrolló un modelo computacional para simular el efecto de los campos eléctricos y magnéticos en la membrana celular. Las células fueron estimuladas con campos eléctricos de 45×10^3 V/m a 12.6×10^5 V/m y campos magnéticos de 2 mT, a frecuencias de 60 kHz, 10 MHz y 1 GHz. Los resultados mostraron que los campos eléctricos aplicados a la membrana celular tienden a aumentar de acuerdo con la frecuencia utilizada, mientras que los campos magnéticos no tienen ningún efecto sobre ella. Se observó que los campos eléctricos generan un concentrador de alto voltaje en la membrana celular de las células elipsoidales cuando se aplica una ventana de frecuencia de 1 kHz a 1 GHz. Estos hallazgos demuestran que, dependiendo de la intensidad del campo y la frecuencia, era posible estimular diferentes zonas de la membrana celular. Este modelo es una herramienta prometedora para establecer los parámetros adecuados para estimular las células y predecir con precisión si la estimulación modifica el potencial de la membrana celular.

1. INTRODUCCIÓN

Los potenciales eléctricos y magnéticos son cruciales en el funcionamiento de los organismos vivos porque estos estímulos promueven y controlan funciones celulares como la proliferación, la migración, la diferenciación, la morfología y la síntesis molecular [1]. Por ejemplo, los campos eléctricos (FE) son responsables, ya sea en la comunicación de células nerviosas o en la apertura de canales de señalización, para el intercambio de moléculas de la matriz extracelular al citoplasma [2]. En cuanto a los campos magnéticos (MF), se producen alrededor del cuerpo humano por la activación de los músculos, [3] debido a la activación eléctrica causada por un MF asociado. Los EF y MF se están investigando ampliamente para encontrar métodos terapéuticos eficientes, por ejemplo, para tratar enfermedades sin realizar intervenciones quirúrgicas, ya que estos estímulos aumentan el metabolismo celular fomentando una curación más rápida de los tejidos lesionados.

Los EF y MF han demostrado tener un efecto positivo en la dinámica celular, como el aumento de la tasa de proliferación y la estimulación de la síntesis de proteínas como el colágeno, el agregado y los glicosaminoglicanos [4-6]. Este efecto positivo en la dinámica celular se debe a la aplicación de agentes externos estímulos sobre la membrana celular, que genera una activación más prolongada de las proteínas de la membrana y un flujo de iones como Ca^{2+} , Na^+ y K^+ [7]. El valor del diferencial potencial a través de la membrana celular generalmente varía entre -20 y -200 mV, dependiendo de la célula tipo y el organismo [8]. Este potencial de transmembrana se establece mediante canales iónicos y proteínas que se integran en la membrana celular [7, 9]. Por lo tanto, si el estímulo externo genera potenciales de transmembrana iguales o superiores a los generados por la célula, sería posible para modificar la concentración de gradiente de iones a través de las bombas de la membrana celular [1]. En consecuencia, durante la estimulación de las membranas celulares con un estímulo biofísico externo, es relevante considerar no solo la magnitud del campo (eléctrico o magnético), sino también la frecuencia, ya que puede modificar el comportamiento de las células [10].

Por otro lado, Foster et al. [11] mencionaron que la excitación de la membrana celular ocurre con valores de 1 KHz o más. Además, sugieren que se requieren 50,000 V/m para producir un efecto en la membrana plasmática en las células redondas. Existe evidencia experimental que demuestra que los EF aplicados a frecuencias entre 20 Hz y 448 kHz promueven la proliferación celular y la síntesis de proteínas [4, 11-14]. Sin embargo, las frecuencias más utilizadas son de 10 a 100 Hz porque se consideran frecuencias naturales, y se ha informado como los parámetros más efectivos para la formación de hueso cuando se estimulan los tejidos [1]. Por otro lado, hay otros informes en los que los estímulos celulares se realizan in vitro con MF entre 0.4 y 2.3 mT [5, 15, 16]. Algunos estudios realizados por Liu et al [17] y De Mattei et al [18] concluyeron que las MF preservan el contenido de proteoglicanos sulfatados, que son los principales responsables de mantener la hidratación y la compresibilidad del tejido cartilaginoso. De manera similar, Stolfa et al, mostraron que las MF estáticas de 0.6 T indujeron un aumento significativo en la actividad metabólica de los condrocitos después de 72 horas de estimulación [19]. Estos hallazgos permiten concluir que las MF son un método terapéutico potencial para la recuperación del cartílago.

Como se mencionó anteriormente, existe evidencia que demuestra el efecto biológico generado tanto para EF como para MF. Sin embargo, no hay estudios que muestren cómo se seleccionan los parámetros de los estímulos biofísicos externos y cómo los EF y MF influyen y estimulan la membrana celular. En consecuencia, se han implementado modelos computacionales para evaluar el efecto de los EF externos y las frecuencias en la membrana celular.

En un estudio desarrollado por Krassowska et al, se modeló una sola célula para observar cómo los EF directos externos afectan la polarización de la célula y el estado fisiológico de la membrana celular [20]. De manera similar, un estudio realizado por Valič et al, simuló células esféricas bajo EF directas [21]. Aunque los resultados de estos estudios evidenciaron que la célula responde a EFs, y la permeabilización de la membrana celular no es solo una función de EF y tamaño celular, sino también de la forma y orientación de la célula, uno de los modelos consideraba la celda redonda como un dominio dimensional [20], que no es similar a la morfología celular real.

Además, en estos trabajos la frecuencia no se consideró como un factor importante para estimular la membrana celular en diferentes zonas. Por esta razón, Taghian y cols. Evaluaron el efecto de los EF externos en una sola capa de células cultivadas en mono-capa usando diferentes frecuencias [22]. Los resultados evidenciaron que la penetración de los EF en la membrana celular depende de la frecuencia aplicada; sin embargo, en este estudio solo se usó la morfología unidimensional de células redondas para simular el efecto de EF sobre la membrana celular.

Con respecto a los modelos computacionales para evaluar cómo las MF afectan las células, Zablotksii et al, implementaron un modelo teórico para evaluar el efecto de las MF en los procesos intercelulares [23]. Los resultados indicaron que las MF (1 T) pueden cambiar significativamente el potencial de la membrana celular y tener un impacto significativo en las propiedades y la funcionalidad biológica de las células. Aunque este hallazgo abre nuevas rutas para aplicar las MF, se sabe que las MF mayores a 0.5 mT causan daño al ADN [24].

En este contexto, consideramos que algunos factores deben tenerse en cuenta: (a) diferentes topologías celulares para evaluar la célula comportamiento de la membrana después de una estimulación con EF y MF, ya que una célula varía su morfología según la etapa y el entorno, (b) la intensidad de la electricidad o MF que se aplicará para mejorar la dinámica celular y evitar el daño celular, y (c) la correcta frecuencia para activar zonas específicas de membrana celular de acuerdo con el objetivo del estudio.

Por consiguiente, planteamos la hipótesis de que los EF o MF bien establecidos pueden ejercer un efecto positivo sobre la membrana celular de las diferentes morfologías celulares. El efecto inducido por el campo genera una estimulación en puntos específicos de la membrana celular donde se encuentran las proteínas de bombeo iónico [1, 9]. Para probar esta hipótesis, se implementó un modelo de elementos finitos para considerar la membrana celular como una capa no conductora que separa dos regiones conductoras: el medio de cultivo y el citoplasma. Aunque se modeló una sola célula en este estudio, se simuló como una célula cultivada in vitro que adquiere diferentes morfologías. La forma de la celda se varió en tres geometrías diferentes: una topología esférica y dos topologías elipsoidales diferentes.

Los resultados mostraron que hay una concentración de carga cuando la forma de la celda es elipsoidal. Significa que los EF se acumularon cuando el área de la celda era más pequeña en el borde. Con respecto a los FM, no hubo un efecto perceptible en la membrana celular que variara tanto la geometría como la magnitud de la frecuencia. Este modelo es una herramienta computacional que puede usarse para encontrar los parámetros apropiados para estimular células y tejidos. Además, esta simulación computacional permite predecir la influencia que tiene una estimulación externa en el potencial de membrana celular. Debido a que el modelo computacional permite controlar las variables utilizadas para estimular las células, como la intensidad y la frecuencia de campo, esta caracterización de parámetros podría ser esencial para las metodologías terapéuticas no invasivas centradas en la recuperación de tejidos.

2. MÉTODO

2.1 Modelo geométrico de una célula

En este estudio se realizó un dominio bidimensional para representar una célula individual en un cultivo de mono-capa (Figura 1). Se consideró la configuración geométrica para simular la célula en tres morfologías específicas: una esférica y dos elipsoidales. Por un lado, la morfología esférica se utilizó para modelar una célula suspendida en el medio de cultivo (Figura 1A). Por otro lado, la morfología elipsoidal se modeló para simular una célula que está iniciando el proceso de adhesión a la placa del pozo (Figura 1B).

Finalmente, se usó una segunda morfología elipsoidal para simular una célula completamente unida en el fondo de la placa del pozo (Figura 1C). Estas formas elipsoidales imitan un borde con pseudópodos y extensiones que contienen contactos focales donde residen las integrinas y otras moléculas de adhesión [25]. Con respecto a la forma elipsoidal, el eje menor (coordenada Y) se redujo, mientras que el eje mayor (coordenada X) se incrementó para mantener un área interna similar en las tres geometrías utilizadas. Las dimensiones implementadas para modelar la celda se muestran en la Tabla 1.

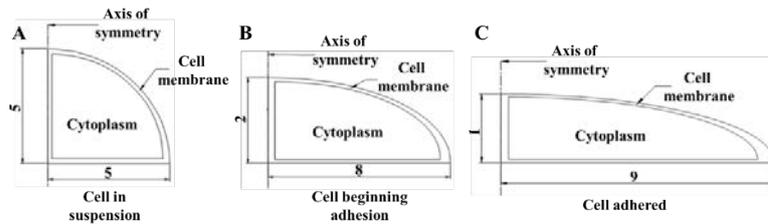


Figura 1. Morfologías celulares utilizadas en el modelo computacional. A, morfología esférica para simular una célula en suspensión en un entorno de mono-capa in vitro; B, morfología elipsoidal de una célula que está comenzando el proceso de adhesión en el fondo de una placa de pozo; C, morfología elipsoidal de una célula completamente unida al fondo de la placa de cultivo

Tabla 1. Dimensiones de las células utilizadas en el modelo computacional

Componente	Parámetro	Dimensión (μm)	Referencia
Membrana celular	Espesor	0.005	[26]
	Eje mayor (μm)	Eje menor (μm)	
Citoplasma		5	[22, 27]
		8	2
		9	1

2.2 Configuración del cultivo celular

Con respecto a la configuración de los cultivos celulares para la estimulación eléctrica, se simuló dos electrodos de acero inoxidable para garantizar la distribución homogénea e isotrópica de los EF (Figura 2A). Por otro lado, se simuló una bobina en orientaciones vertical y horizontal para aplicar los MF (Figura 2B). En el medio de los electrodos y la bobina, se simuló una placa de pozo para reproducir la superficie en la que se unen las células. El aire, los medios de cultivo y la célula individual en sus tres morfologías se consideraron dentro de la configuración del cultivo celular. Todos los dominios se consideraron como modelos axisimétricos porque estas configuraciones rotacionales reducen los análisis computacionales y los resultados se pueden extrapolar a un entorno tridimensional que realiza una revolución en el eje central.

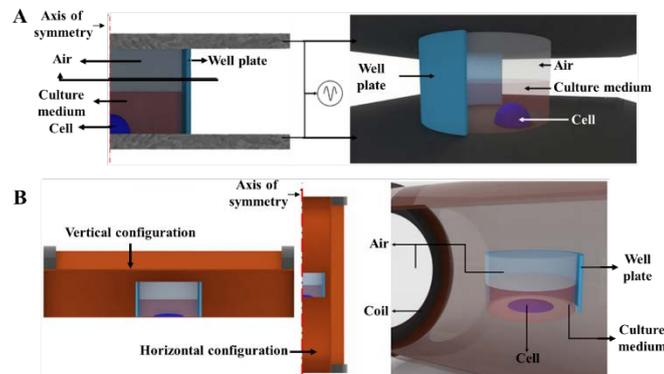


Figura 2. Geometrías utilizadas para simulaciones computacionales axisimétricas. A, configuración de cultivo celular para aplicar los campos eléctricos sobre las células; B, configuración de cultivo celular para aplicar los campos magnéticos sobre las células

2.3 Condiciones de frontera y discretización de la geometría

Los dominios y las geometrías celulares fueron mallados utilizando una malla triangular con elementos de $1.5 \mu\text{m}$, y con un refinamiento de malla de $0,005 \mu\text{m}$ alrededor de la membrana celular alcanzando un tamaño mínimo de $0.003 \mu\text{m}$. En la Figura 3 es posible observar el dominio axisimétrico utilizado para las simulaciones eléctricas. El dominio está compuesto por los electrodos, la placa del pozo, los medios de cultivo, la célula y el aire (Figura 3A). El dominio para simulaciones eléctricas fue mallado con 495.925 elementos triangulares (Figura 3B), mientras que para simulaciones magnéticas el dominio fue mallado con 291.019 elementos triangulares (ver Figura 4).

Se realizó un refinamiento de malla cerca de la membrana celular de la célula para visualizar mejor los resultados cuando la electricidad y las MF alcanzan la membrana plasmática (Figura 3C). La figura 3D muestra la membrana celular en detalle, que se divide en dos regiones para medir el potencial eléctrico en las regiones interna y externa de la célula. Las condiciones límite para las simulaciones eléctricas y magnéticas consistieron en una temperatura de 310K y una presión atmosférica estándar de 1 atm. El dominio implementado para simulaciones magnéticas y refinamiento de malla se puede observar en la Figura 4. El mismo dominio y refinamiento de malla de la membrana celular se usó para las morfologías celulares elipsoidales que fueron estimuladas eléctrica y magnéticamente (los datos no se muestran).

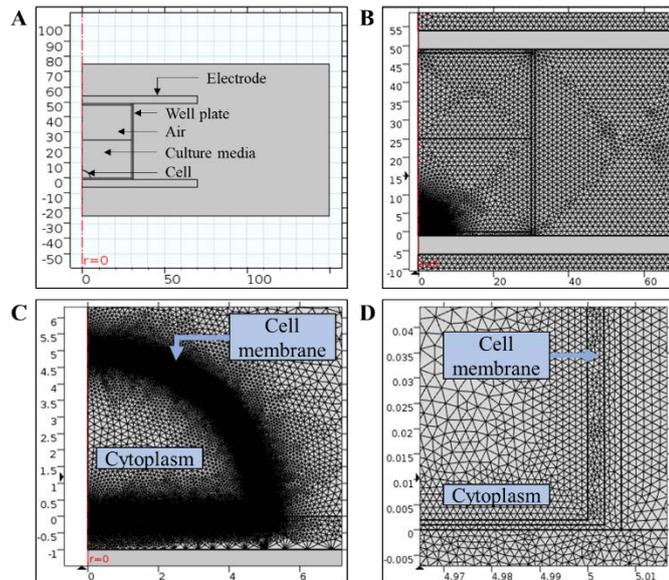


Figura 3. Refinamiento de dominio y malla utilizado para simulaciones eléctricas. A) esquema representativo que ilustra el sistema de cultivo para simulaciones eléctricas; B) la malla utilizada en una simulación de campo eléctrico; C) refinamiento de malla realizado en la membrana celular de una célula redonda; D) esquema de aumento que muestra las dos regiones de la membrana celular

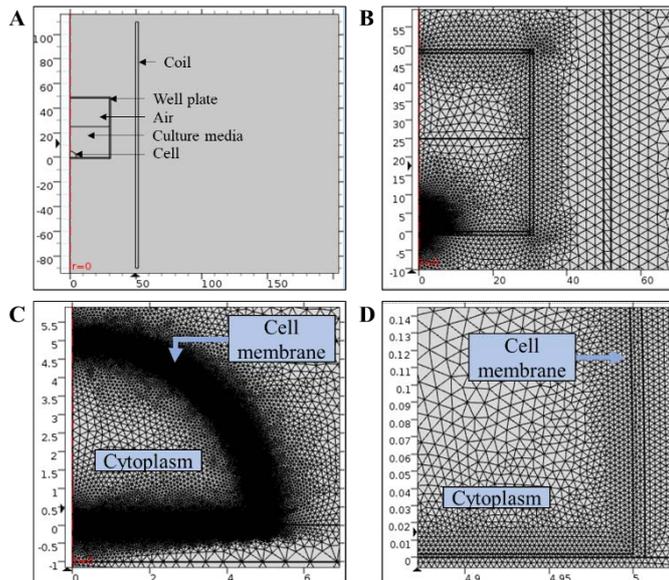


Figura 4. Dominio y refinamiento de malla utilizado para simulaciones magnéticas. A) Esquema representativo que ilustra el sistema de cultivo para simulaciones magnéticas. B) La malla utilizada en una simulación MF. C) Refinamiento de malla realizado en la membrana celular de una célula redonda. D) Esquema de aumento que muestra las dos regiones de la membrana celular.

2.4 Propiedades eléctricas y magnéticas

El modelo computacional se resolvió en el dominio de la frecuencia resolviendo las ecuaciones de Maxwell, que describen los fenómenos electromagnéticos a lo largo del tiempo (Ecuaciones (1) a (4)) [28].

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 j + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4)$$

Donde E es el EF, B es el MF, ρ es una función de carga y j es una corriente eléctrica. Las cantidades ϵ_0 y μ_0 son constantes físicas llamadas permitividad y permeabilidad del vacío, respectivamente. La velocidad de la luz c resulta de la relación $c^2 = 1/\epsilon_0\mu_0$. Cuando se especifican las condiciones de contorno para los campos, estas ecuaciones determinan de manera única y completa los campos. Las propiedades y dimensiones eléctricas y magnéticas de los dominios utilizados en las simulaciones se muestran en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Propiedades eléctricas utilizadas en la simulación

Componente	Parámetro	Valor	Referencia
Membrana celular	Permitividad relativa	11.3	[11]
	Conductividad eléctrica	0	
	Permeabilidad relativa*	1	
Citoplasma	Permitividad relativa	80	[29]
	Conductividad eléctrica	1.5 [S/m]	
	Permeabilidad relativa*	1	
Medio de cultivo	Permitividad relativa	80	[29]
	Conductividad eléctrica	1.5 [S/m]	
	Permeabilidad relativa*	1	
Cobre	Permitividad relativa	1	
	Conductividad eléctrica	5.998E7 [S/m]	
	Permeabilidad relativa	1	
Acero inoxidable	Permitividad relativa	1	
	Conductividad eléctrica	1.7391 [S/m]	
Caja de cultivo	Permitividad relativa	2.6	[22]
	Conductividad eléctrica	10E-16 [S/m]	
	Permeabilidad relativa	1	
Aire	Permitividad relativa	1	
	Conductividad eléctrica	0 [S/m]	
	Permeabilidad relativa	1	

Nota: La permeabilidad relativa de los tejidos es aproximadamente 1 [31]

Tabla 3. Dimensiones geométricas del modelo

Componente	Parámetro	Dimensión (µm)	Referencia
Membrana celular	Espesor	0.005	[26]
Medio de cultivo	Alto	25	
	Ancho	30	
Bobina	Ancho	2	
	Alto	200	
Caja de cultivo	Distancia del eje	50	
	Espesor	1	[22]
Electrodos	Separación	50	
	Espesor	5	
Aire	Ancho	70	
	Alto	30	

Los EF entre los electrodos se generaron usando un potencial diferencial de 100 Vp-p a frecuencias de 60 kHz, 10 MHz y 1 GHz [4, 22]. Además, se aplicó una ventana de frecuencia de 1 kHz a 1 GHz para medir el EF en cinco partes diferentes de la membrana plasmática celular. Por otro lado, la corriente y el número de vueltas de la bobina para obtener MF de 2 mT, fueron 0.024 A y 15, respectivamente [15, 18]. Similar a las simulaciones EF, las frecuencias probadas fueron 60, 10 y 1 GHz. La bobina se modeló como un área extendida para evitar efectos de borde [32].

2.5 Implementación del modelo

Los dominios y ecuaciones fueron discretizados y resueltos numéricamente utilizando el método de elementos finitos. Los modelos computacionales se simularon y resolvieron en el software COMSOL Multiphysics. En la Figura 5 se describe el procedimiento llevado a cabo para simular el efecto generado por la electricidad y los MF en una sola celda.

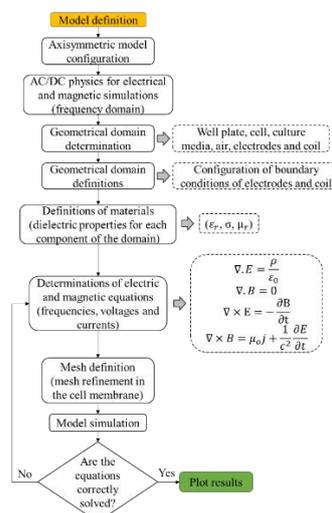


Figura 5. Diagrama de flujo representativo de la implementación del modelo computacional

Primero, se seleccionó la configuración axisimétrica para representar ambos dominios, eléctrico y magnético. Luego, se seleccionó el módulo de corriente alterna (CA) / corriente continua (CC) para simular los EF y MF; adicionalmente, se seleccionó el estudio de dominio de frecuencia ya que ambos campos se aplicaron en AC. Posteriormente, se construyeron los dominios compuestos por la placa del pozo, los medios de cultivo celular, el aire, la célula, los electrodos y la bobina. Las condiciones de contorno se asignaron dentro del modelo a cada dominio. Una vez que se restringieron los dominios, se definieron las propiedades del material, como la permitividad relativa (ϵ_r), la conductividad eléctrica (σ) y la permeabilidad relativa (μ_r) para cada componente del modelo. Luego, las ecuaciones para electricidad y MF se definieron e insertaron en el modelo. Después, los dominios fueron mallados utilizando elementos triangulares; Además, se realizó un refinamiento de malla en la membrana celular. Finalmente, el modelo se resolvió para observar la distribución del campo en todo el dominio. En el caso de que el modelo no se resolviera, se verificaron las ecuaciones y sus parámetros.

3. RESULTADOS

3.1 Estimulación eléctrica

La primera simulación consistió en encontrar los EF que estimulan la membrana celular de las células esféricas y elipsoidales (Figura 6). En la Figura 6A se muestra una representación esquemática para observar la distribución de EF dentro de la membrana celular, el entorno extracelular y el citoplasma, así como el flujo del EF alrededor de la membrana celular (flechas amarillas en la Figura 6A). Los resultados mostraron que los EF en la membrana celular de las células de morfología redonda eran de 45×10^3 V/m para una frecuencia de 60 kHz, mientras que para frecuencias de 10 MHz y 1 GHz los EF eran 69×10^3 y 72×10^3 V/m, respectivamente (Figura 6B). Los resultados evidenciaron que los FE tienden a disminuir en el borde de las membranas celulares esféricas; sin embargo, esta reducción de campo fue uniforme cuando el radio de la membrana celular era constante. La primera morfología de células elipsoidales estimulada con 60 kHz evidenció un EF de 8.1×10^5 V/m sobre la membrana celular (Figura 6C), mientras que la segunda morfología elipsoidal evidenció un EF de 1.31×10^6 V/m en la membrana plasmática (Figura 6D).

Ambas morfologías de células elipsoidales estimuladas con frecuencias de 10 MHz y 1 GHz no evidenciaron el efecto pico en el borde de la membrana celular. Fue posible observar que el efecto de los EF en la membrana celular de las células elipsoidales era mayor cuando aumentaban las frecuencias. Un fenómeno físico conocido como el efecto pico ocurrió después de estimular la membrana celular de las morfologías elipsoidales. Este fenómeno muestra la acumulación de una carga eléctrica en la superficie de un material, que es estimulada por los EF externos [33,34]. El valor de carga obtenido por el efecto pico se distribuye equitativamente por toda la superficie; por lo tanto, si el área es más pequeña, la densidad de carga tenderá a ser mayor. En consecuencia, el pico presentado en las Figuras 6C y 6D representan una densidad de carga en una zona específica de la membrana celular cuando la célula fue estimulada con una frecuencia de 60 kHz.

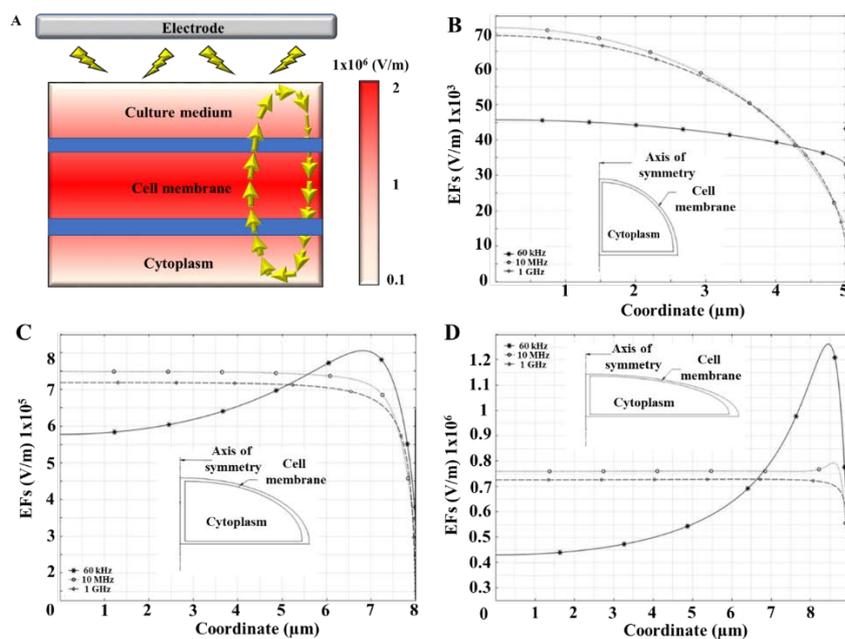


Figura 5. Distribución de los campos eléctricos (EF) a través de la membrana celular de las células esféricas y elipsoidales estimuladas con frecuencias de 60 kHz, 10 MHz y 1 GHz. A) Distribución de EF en la membrana celular de una célula elíptica, el medio de cultivo y el citoplasma a 60 kHz; B) EF en la membrana celular de una célula esférica suspendida en el medio de cultivo; C) EF en la membrana celular de una célula elipsoidal que está iniciando el proceso de unión; D) EF en la membrana celular de una célula elipsoidal completamente unida al fondo de la placa del pozo

En la Figura 7A se muestra una comparación de los EF inducidos en la membrana plasmática de las células que fueron estimulados con EF a 60 kHz. Fue posible observar que las células con forma esférica tenían un EF más bajo en comparación con los EF en el borde de las células de morfología elipsoidal. Para observar cómo la frecuencia influye en la membrana celular en términos de distribución de EF, se utilizó una simulación de ventana de frecuencia de 1 kHz a 1 GHz para calcular los EF en cinco partes diferentes de la membrana celular de una célula elipsoidal (Figura 7B). Se evidenció que en los puntos A y B, cerca del centro de la célula, los EF eran más bajos, a 0.43×10^6 y 0.51×10^6 V/m, respectivamente. En el punto C, cerca del borde de la célula, la concentración de EF en la membrana celular cuando la célula fue estimulada con frecuencias más bajas fue la más alta (1.25×10^6 V/m). Se observó un EF constante de 1.1×10^6 V/m en el punto D cuando la célula se estimuló con frecuencias de 1 kHz a 100 MHz. Finalmente, se obtuvo un EF constante de 0.77×10^6 V/m en el fondo de la placa del pozo (punto E) cuando la célula se estimuló con frecuencias de 1 kHz a 1 GHz. Independientemente de la zona en la membrana celular, los EF tienden a presentar un comportamiento asintótico cuando la estimulación se aplicó a frecuencias más altas.

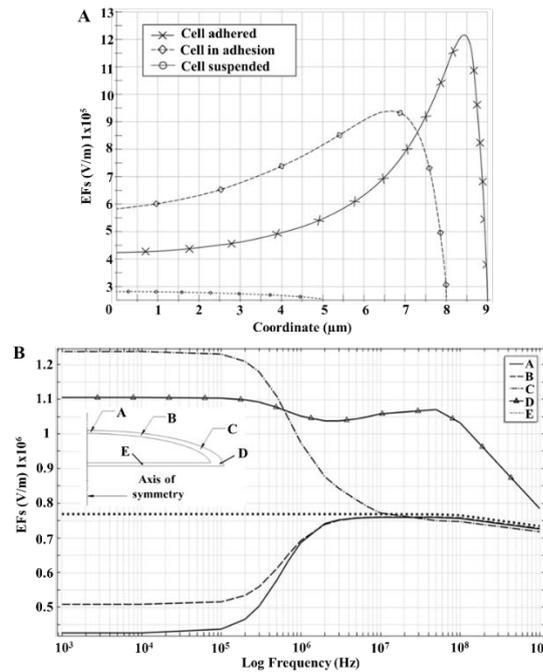


Figura 7. Representación esquemática del efecto máximo en todas las morfologías celulares y ventana de frecuencia frente a campos eléctricos en diferentes puntos de la membrana celular. A) Comparación del efecto máximo generado en el borde de la membrana celular de las células esféricas y elipsoidales que fueron estimuladas con una frecuencia de 60 kHz; B) medición de una ventana de frecuencia de 1 kHz a 1 GHz realizada en una celda elipsoidal

3.2 Estimulación magnética

La distribución de MF a través de la membrana celular elipsoidal y el sistema de cultivo se muestra en la Figura 8. Fue posible observar que la MF era completamente homogénea entre el entorno extracelular, la membrana celular y el citoplasma (Figura 8A). La distribución de los MF fue uniforme dentro de la bobina con un valor de 2 mT (Figura 8B). Estos resultados fueron los mismos, variando las frecuencias, la forma de la celda y la orientación de la bobina (horizontal y vertical).

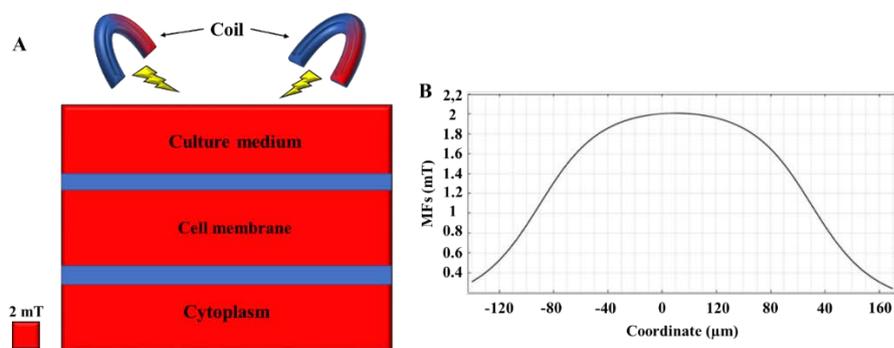


Figura 8. Distribución de los campos magnéticos (MF) a través de la membrana celular y la bobina con una frecuencia de 60 kHz. A) Distribución de MF en la membrana celular de una célula elíptica, medio de cultivo y citoplasma a 60 kHz; B) Distribución de MF a través de la longitud del citoplasma de la bobina (Figura 8A). La distribución de los MF fue uniforme dentro de la bobina con un valor de 2 mT (Figura 8B). Estos resultados fueron los mismos, variando las frecuencias, la forma de la celda y la orientación de la bobina (horizontal y vertical)

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este estudio presenta un modelo computacional para simular y analizar el efecto causado por un EF inducido externamente en la membrana celular de una sola célula cultivada en una configuración *in vitro*. Los resultados demostraron que, dependiendo de la morfología celular, las intensidades de EF que estimulan la membrana celular pueden aumentar o disminuir. Además, la frecuencia es un factor relevante, ya que dependiendo de la periodicidad a la que se aplica el EF, se pueden estimular diferentes zonas de la membrana celular con una intensidad de EF específica. Este resultado computacional proporciona información clave no solo para comprender los mecanismos de las respuestas celulares a la estimulación eléctrica, sino también para predecir qué esquema de estimulación puede superar el potencial de membrana para modificar las concentraciones de gradiente a través de las bombas iónicas. Tal alteración iónica podría desencadenar la activación de proteínas intracelulares para aumentar la actividad molecular de una célula [9].

Algunos estudios que usan EF y MF como estímulo biofísico externo han observado un aumento en la proliferación, migración, diferenciación celular y síntesis de proteínas [4-6, 17, 18, 35, 36] Aunque el efecto sobre los receptores de la membrana celular y la dinámica celular tales como la proliferación y la síntesis molecular no se simuló en este trabajo, hemos evaluado previamente los efectos *in vitro* de EF y MF sobre los condrocitos mono-capa. En un estudio anterior, los hallazgos indicaron que los EF de 4 y 8 mV/cm aplicados a una forma de onda sinusoidal de 60 kHz mejoraron la tasa de proliferación y mantuvieron estable la síntesis de glicosaminoglicanos [4].

En nuestro trabajo más reciente, se evidenció que la mejor tasa de proliferación se obtuvo con MF de 2mT aplicados durante 3 horas cada 6 horas durante 8 días. Además, el aumento en la síntesis de glicosaminoglicanos fue estadísticamente significativo cuando las células fueron estimuladas con MF de 2mT aplicadas durante 5 horas cada 6 horas durante 8 días [37]. Los estudios mencionados anteriormente han evidenciado que tanto los EF como los MF impactan positivamente la dinámica celular de condrocitos en términos de proliferación y síntesis molecular; sin embargo, no se analizó el mecanismo por el cual las estimulaciones biofísicas externas influyen sobre los receptores de membrana y sus vías de señalización.

Para comprender el efecto que tiene una estimulación electromagnética sobre la célula, algunos autores han sugerido que los estímulos eléctricos y magnéticos permiten la activación de mecanismos de señalización a través de los canales de calcio dependientes de voltaje (VDCC) y receptores de potencial (TRPV4) [38-40]. Estos canales se pueden abrir en respuesta a cambios en el potencial de membrana causados por una estimulación externa. La activación de los canales iónicos permite que los gradientes de difusión inorgánica iónica sean mayores a través de la membrana celular para activar diferentes eventos bioquímicos como la expresión de genes y proteínas [9, 39, 41]. Si VDCC o TRPV4 se activan eléctricamente, una afluencia de iones como intracelular el calcio (Ca^{2+}) entra al citoplasma y activa diferentes factores de transcripción. Por ejemplo, los EF aumentan la entrada de Ca^{2+} , que se une con calmodulina, una proteína intracelular que regula la transducción de señales de calcio dentro de la célula. Este proceso de unión induce la expresión de SOX9, que promueve la producción de proteínas como el colágeno tipo II y el agregan [9,40,42]. Se ha demostrado que los MF inductivos también influyen en la activación de Ca^{2+} [1].

A diferencia de los EF, que afectan directamente el VDCC, las MF aumentan los niveles intracelulares de Ca^{2+} estimulando orgánulos como las mitocondrias y el retículo endoplásmico. El aumento de Ca^{2+} desencadena la activación de la calmodulina citoesquelética, lo que resulta en la activación de la síntesis molecular [9,38,40,42]. Múltiples experimentos *in vitro* han indicado que los MF promueven la proliferación celular y la síntesis molecular de condrocitos; por lo tanto, este estímulo biofísico podría ser un tratamiento terapéutico potencial para la regeneración de tejidos [5,15-18,43,44] Considerando esta evidencia, este modelo computacional es una herramienta útil desde un punto de vista biofisiológico, porque es posible predecir la intensidad del estímulo biofísico que estimula una zona específica de la membrana celular.

Aunque este modelo puede extrapolarse para estimular diferentes tipos de células para observar cómo se pueden alterar los potenciales de membrana, podría mejorarse simulando el flujo de entrada y salida de iones inorgánicos y su efecto sobre la dinámica celular, y teniendo en cuenta las propiedades morfofisiológicas de cada tejido y células; por ejemplo, para simular cómo los EF y MF afectan las proteínas de la membrana celular y los orgánulos del citosol permitiendo el transporte activo (por la apertura del canal iónico y la estimulación de las bombas) y el transporte pasivo (por difusión iónica) de los iones a través de él. Está bien documentado que los canales iónicos son relevantes para activar diferentes vías de señalización dentro de la célula.

Por esta razón, este modelo computacional podría mejorarse si se modifica la regulación molecular extra e intracelular mientras se estimula la célula con estímulos biofísicos externos. Aunque la ruta de señalización derivada del flujo de canales iónicos no se modeló en este estudio, este aspecto debería ser el foco de futuros trabajos para aclarar cómo los estímulos biofísicos externos actúan sobre las estructuras internas desde un punto de vista electro-biológico. Teniendo en cuenta lo anterior, nuestros resultados sugieren que los mecanismos celulares implicados en la respuesta biológica a las MF son diferentes en comparación con los EF. Sin embargo, no hay modelos similares disponibles y se necesita más investigación para confirmar nuestras observaciones.

Los resultados derivados de este estudio concuerdan con los obtenidos por Taghian et al, ya que fue posible evidenciar que la frecuencia tiene un efecto en las membranas celulares cuando son estimuladas con EF [22]. Sin embargo, existen variaciones notables en comparación con nuestros resultados, como el EF en células redondas estimuladas con 10 MHz fue de 12×10^5 V/m para el estudio mencionado anteriormente, mientras que obtuvimos un EF de 72×10^3 V/m. Esta discrepancia en magnitud podría ser causada por el refinamiento de la malla al dominio celular y las propiedades dieléctricas utilizadas en el modelo. Además, en nuestro estudio se observaron algunos cambios en la distribución de los FE en la membrana celular en función de la morfología celular cuando la forma cambia de esférica a elipsoidal. Aquí, es notable mencionar que el efecto causado por la estimulación externa podría variar si se simula la topografía celular real, ya que hay cambios significativos de altura (eje Z) en el rango de la célula, siendo mayor en la región media con el núcleo contenido. Las diferencias más relevantes observadas fueron el área de concentración de carga cuando la celda se adhiere a la placa del pozo.

Esto puede ser relevante al interpretar los resultados in vitro y su posible extrapolación a investigaciones in vivo. En base a esta observación, algunos estudios in vitro demuestran que los valores de EF inducen la permeabilización de la membrana celular. Por ejemplo, Teissie et al [45] aplicaron EF a las células de ovario de hámster chino y demostraron que si bien la magnitud de la EF aumenta, la permeabilización de la célula aumenta hasta un valor de 1 kV/cm. Resultados similares fueron obtenidos por Saulis et al [46], quienes aumentaron la concentración extracelular de potasio (K^+) con un valor máximo de 1,2 kV/cm. Comparando esos resultados con el modelo, es posible decir que la frecuencia de 60 kHz con una forma esférica tiene valores de EF similares sobre la membrana celular. Teniendo en cuenta que algunos estudios experimentales han observado el efecto generado por los estímulos biofísicos externos sobre los receptores de la membrana celular, cabe mencionar que este estudio presenta limitaciones para validar los resultados computacionales obtenidos. Por esta razón, es necesaria una validación experimental para observar cómo diferentes frecuencias modifican la respuesta de la membrana celular en términos de flujos de concentración de iones y su incidencia en la dinámica celular, como la viabilidad, la migración, la proliferación y la síntesis molecular [1, 47].

De acuerdo con los resultados obtenidos por Caraglia et al, podemos hipotetizar que los EF podrían inducir la muerte celular, ya que en su estudio se evidenció que los EF aplicados a 1.95 GHz disminuyen la viabilidad de las células cancerosas [48]. En este contexto, se debe concluir que la estimulación a frecuencias muy altas no es favorable para la viabilidad celular. Por lo tanto, los modelos computacionales podrían ser una herramienta importante para lograr una comprensión clara de cómo los estímulos biofísicos externos afectan la integridad de la membrana celular y los orgánulos internos. En este contexto, el modelo presentado aquí tiene algunas limitaciones en términos de simulación del efecto generado por los EF y MF sobre los receptores de membrana celular y las estructuras orgánicas internas de la célula. Sin embargo, se ha evidenciado que los EF con nano-pulsos de 60 kV/cm a 60 ns aplicados a diferentes tipos de células indujeron daño al citoesqueleto, la membrana nuclear y las secuencias de los telómeros [49]. Estos resultados contrastan con los hallazgos reportados por otros estudios que han producido resultados prometedores en términos de proliferación, migración y síntesis molecular [4, 18, 35, 36, 44]. Teniendo en cuenta que la recuperación celular después de pulsos eléctricos o magnéticos externos se ha observado y está bien documentado, Pliquett et al, establecen que la destrucción en la membrana nuclear u otras membranas internas probablemente podría producir graves trastornos biológicos, lo que llevaría a la irreversibilidad y la muerte celular [50].

Es relevante mencionar que este estudio presenta ciertas limitaciones, porque un cultivo mono-capa tiene una población de contacto de célula a célula cuando se topan entre sí. Este contacto permite efectos paracrinos célula-célula, que afectan las propiedades eléctricas de la célula y la población en general. Además, se sabe que el impacto de una sola célula puede enviar ondas de señalización de Ca^{2+} a través de las células vecinas y efectos electroquímicos similares [51]. Debido a este hecho, se propone que los estudios futuros se dirijan a la realización de una simulación en tres dimensiones con varias celdas cercanas entre sí, por lo que se puede analizar si hay algún cambio o interacción entre las celdas cuando están expuestas a EF o MF. Es importante encontrar experimentalmente las propiedades magnéticas de las células, como la permeabilidad relativa de la membrana celular y el citoplasma, para encontrar una explicación precisa del efecto de MF causado sobre la célula.

5. CONCLUSIONES

Se ha descrito bien que los EF y MF se usan en ensayos fisioterapéuticos para aliviar el dolor localmente [52, 53]. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que estos estímulos biofísicos no solo tienen un efecto en diferentes partes lesionadas del cuerpo humano, sino que también pueden desencadenar las respuestas moleculares deseadas a nivel celular y tisular [10, 12, 36, 37, 48, 54]. Por esta razón, diferentes investigaciones han estado trabajando para evaluar el efecto generado por los EF y MF a nivel celular para comprender cómo estos estímulos biofísicos modifican las vías de señalización a nivel intracelular y extracelular [9].

Considerando que la estandarización de protocolos para encontrar los mejores parámetros para estimular las células es un desafío, y que los procedimientos experimentales para evaluar el efecto generado por las estimulaciones externas están bien documentados, existe la necesidad de encontrar métodos alternativos que permitan predecir la respuesta de células y tejidos después de una estimulación, ya sea con EF o MF. En consecuencia, los modelos

numéricos son herramientas útiles que se pueden implementar, no solo para predecir la influencia de los estímulos biofísicos sobre el entorno intra y extracelular de las células, sino también para simular las configuraciones de los dispositivos de acuerdo con las necesidades del experimento.

El modelado computacional de electricidad y MF tiene el potencial de simular diferentes procesos celulares como viabilidad, proliferación, migración, diferenciación y síntesis molecular [1, 22]. De hecho, los modelos computacionales tienen la versatilidad para cuantificar, predecir y comprender el comportamiento de sistemas complejos que muestran un comportamiento no lineal en el espacio y el tiempo [55]. El modelo computacional desarrollado en este estudio proporciona una herramienta predictiva que cuantifica la electricidad y los MF que estimulan diferentes zonas de la membrana celular. Este hallazgo no solo permite comprender cómo se puede estimular el potencial de la membrana celular, sino que también sirve como una herramienta para predecir los EF o MF que podrían desencadenar diferentes respuestas celulares. De hecho, este modelo computacional podría mejorarse si se considera la propiedad galvanotáctica de la célula, ya que la dirección, la concentración y el aislamiento de las células podrían simularse para predecir el papel clave de la célula durante el crecimiento del tejido [1].

En general, el modelo computacional es una herramienta prometedora que, combinada con datos experimentales, podría usarse para estandarizar las intensidades eléctrica y magnética, los tiempos de estimulación y el período en que las muestras biológicas deben estar bajo estimulación para aumentar la tasa de proliferación y estimular la síntesis molecular. Este trabajo muestra un enfoque computacional como una herramienta para comprender el mecanismo por el cual los EF y MF impactan el potencial de membrana. Estos resultados demuestran que los modelos computacionales son un mecanismo útil para predecir los efectos causados por un estímulo externo a escalas micrométricas y extrapolar estas observaciones a un posible escenario experimental. Además, el modelo presentado en este estudio tiene la versatilidad para modificar parámetros tales como electrodos y dimensiones de la bobina, tipos de placa de pozo, morfologías celulares, frecuencias y voltajes para encontrar los mecanismos eléctricos y magnéticos que mejor se adapten a las respuestas celulares requeridas. En este contexto, los dispositivos de estimulación eléctrica y magnética que se utilizan en métodos terapéuticos en ensayos clínicos pueden simularse antes de la construcción para mejorar la comodidad del paciente y el cumplimiento del tratamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia por proporcionar el Laboratorio de Biomiméticos. Este trabajo fue apoyado por el proyecto *Evaluación in vitro del efecto de los estímulos biofísicos en cultivos celulares, como una herramienta para estimular la regeneración de los tejidos articulares*, financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) a través de la subvención 712-2015 No. 50457.

REFERENCIAS

- [1] Balint, R., Cassidy, N. y Cartmell, S. (2013). Electrical stimulation: A novel tool for tissue engineering. *Tissue Eng Part B Rev.* 19(1), 48-57.
- [2] Chao, E. y Inoue, N. (2003). Biophysical stimulation of bone fracture repair, regeneration and remodelling. *Eur Cell Mater.* 6(1979), 72-85.
- [3] Cohen, D. y Givler, E. (1972). Magnetomyography: magnetic fields around the human body produced by skeletal muscles. *Appl Phys Lett.* 21(114), 34-37.
- [4] Vaca, J. et al. (2016). An in vitro chondrocyte electrical stimulation framework: a methodology to calculate electric fields and modulate proliferation, cell death and glycosaminoglycan synthesis. *Cell Mol Bioeng.* 9(1), 116-126.
- [5] Vanessa, N. et al. (2007). In vitro exposure of human chondrocytes to pulsed electromagnetic fields. *Eur. J. Histochem.* 51(3), 203-211.
- [6] Martino, C. et al. (2010). Effects of weak static magnetic fields on endothelial cells. *Bioelectromagnetics* 31(4), 296-301.
- [7] Sundelacruz, S., Levin, M. y Kaplan, D. (2009). Role of membrane potential in the regulation of cell proliferation and differentiation. *Humana Press* 5(3), 231-246.
- [8] Alberts, B. et al. (2002). Membrane transport of small molecules and the electrical properties of membranes. *Molecular Biology of the Cell.* CRC Press.
- [9] Xu, J. et al. (2009). Signal transduction in electrically stimulated articular chondrocytes involves translocation of extracellular calcium through voltage-gated channels. *Osteoarthritis Cartil.* 17(3), 397-405.
- [10] Kaji, M. et al. (2018). Generating change in membrane potential by external electric stimulation and propagating the change by using nerve model cell systems. *Electrochim Acta* 282, 89-96.
- [11] Foster, K. (2000). Thermal and nonthermal mechanisms of interaction of radio-frequency energy with biological systems. *IEEE Trans Plasma Sci.* 28(1), 15-23.
- [12] Luisa, M. et al. (2014). Electric stimulation at 448 kHz promotes proliferation of human Mesenchymal stem cells. *Cell Physiol Biochem.* 34(5), 1741-1755.
- [13] Zizic, T., Hoffman, K. y Holt, P. (1995). Treatment of osteoarthritis of the knee with pulsed electrical stimulation. *Rheumatology* 22(9), 1757-1761.
- [14] Zhang, B. et al. (2010). The effects of low frequency electrical stimulation on satellite cell activity in rat skeletal muscle during hindlimb suspension. *BioMed Central* 11(87), 1-9.
- [15] Fini, M. et al. (2005). Effects of pulsed electromagnetic fields on articular hyaline cartilage: Review of experimental and clinical studies. *Biomed Pharmacother* 59(7), 388-394.

- [16] De Mattei, M. et al. (2001). Effects of pulsed electromagnetic fields on human articular chondrocyte proliferation. *Connect Tissue Res.* 42(4), 269-279.
- [17] Liu, B. (1996). Pulsed electromagnetic fields influence hyaline cartilage extracellular. *Osteoarthritis Cartil* 4(1), 63-76.
- [18] De Mattei, M. et al. (2004). Effects of physical stimulation with electromagnetic field and insulin growth factor-I treatment on proteoglycan synthesis of bovine articular cartilage. *Osteoarthritis Cartil* 12(10), 793-800.
- [19] Stolfá, S. et al. (2007). Effects of static magnetic field and pulsed electromagnetic field on viability of human chondrocytes in vitro. *Physiol Res Sci Bohemoslov* 56(1), 45-49.
- [20] Krassowska, W. y Neu, J. (1994). Response of a single cell to an external electric field. *Biophys J.* 66(6), 1768-1776.
- [21] Valiĉ, B. et al. (2003). Effect of electric field induced transmembrane potential on spheroidal cells: Theory and experiment. *Eur Biophys J.* 32(6), 519-528.
- [22] Taghian, T., Narmoneva, D. y Kogan, A. (2015). Modulation of cell function by electric field: A high-resolution analysis. *R. Soc.* 12(107), 21-25.
- [23] Zablotskii, V. et al. (2016). How a high-gradient magnetic field could affect cell life. *Sci Rep.* 6(37407), 1-13.
- [24] Mihai, C. et al. (2014). Extremely low-frequency electromagnetic fields cause DNA strand breaks in normal cells. *J. Environ Health Sci Eng.* 12(1), 15-25.
- [25] Onuma, E. y Hui, S. (1988). Electric field-directed cell shape changes, displacement, and cytoskeletal reorganization are calcium dependent. *J. Cell Biol.* 106(6), 2067-2075.
- [26] Kotnik, T. y Miklavcic, D. (1998). Time course of transmembrane voltage induced by time-varying electric fields—A method for theoretical analysis and its application. *Bioelectrochem Bioenerg.* 45(1), 3-16.
- [27] Schoenbachk, K. et al. (2004). Ultrashort electrical pulses open a new gateway into biological cells. In Conference Record of the Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium. San Francisco, USA.
- [28] Fleisch, D. (2008). *A Student's Guide to Maxwell's Equations.* Cambridge University Press.
- [29] Fear, E. y Stuchly, M. (1998). Modeling assemblies of biological cells exposed to electric fields. *IEEE Trans Biomed Eng.* 45(10), 1259-1271.
- [30] Zhadobov, M. et al. (2012). Complex permittivity of representative biological solutions in the 2-67 GHz range. *Bioelectromagnetics* 33(4), 346-355.
- [31] Marinova, I. y Mateev, V. (2010). Electromagnetic field modeling in human tissue. *Int. J. Biomed Biol Eng.* 4(4), 140-145.
- [32] Anderson, M., Woessner, W. y Hunt, R. (2015). Model dimensionality and setting boundaries. In Anderson, M., Woessner, W. y Hunt, R. (Eds.), *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport* (pp. 117-180). A. Press.
- [33] Yang, Y. et al. (2017). Inspired by the 'tip effect': A novel structural design strategy for the cathode in advanced lithium-sulfur batteries. *J. Mater Chem A.* 5(7), 3140-3144.
- [34] Zhang, R. et al. (2016). Conductive nanostructured scaffolds render low local current density to inhibit Lithium dendrite growth. *Adv Mater.* 28(11), 2155-2162.
- [35] Brighton, C., Wang, W. y Clark, C. (2008). The effect of electrical fields on gene and protein expression in human osteoarthritic cartilage explants. *J. Bone Jt Surg Am.* 90(4), 833-848.
- [36] Brighton, C., Wang, W. y Clark, C. (2006). Up-regulation of matrix in bovine articular cartilage explants by electric fields. *Biochem Biophys Res Commun.* 342(2), 556-561.
- [37] Escobar, J. et al. (2019). In vitro evaluation of the effect of stimulation with magnetic fields on chondrocytes. *Bioelectromagnetics* 41(1), 41-51.
- [38] Lieben, L. y Carmeliet, G. (2012). The involvement of TRP channels in bone homeostasis. *Front Endocrinol.* 3(99), 1-9.
- [39] Kis, K. et al. (2011). Voltage-gated sodium channel Nav1.7 maintains the membrane potential and regulates the activation and chemokine-induced migration of a monocyte-derived dendritic cell subset. *J. Immunol.* 187(3), 1273-1280.
- [40] Matta, C., Zákány, R. y Mobasher, A. (2015). Voltage-dependent calcium channels in chondrocytes: Roles in health and disease. *Curr Rheumatol Rep.* 17(43), 1-11.
- [41] Hartig, M., Joos, U. y Wiesmann, H. (2000). Capacitively coupled electric fields accelerate proliferation of osteoblast-like primary cells and increase bone extracellular matrix formation in vitro. *Eur. Biophys J.* 29(7), 499-506.
- [42] Matta, C. (2013). Calcium signalling in chondrogenesis implications for cartilage repair. *Front Biosci.* 1(5), 305-324.
- [43] Pezzetti, F. et al. (1999). Effects of pulsed electromagnetic fields on human chondrocytes: an in vitro study. *Calcif Tissue Int.* 65(5), 396-401.
- [44] Livingston, A., Moanty, M. y Chittaranjan, S. (2011). Pulsed electromagnetic field therapy results in healing of full thickness articular cartilage defect. *Int. Orthop.* 35(2), 143-148.
- [45] Teissie, J. y Rols, M. (1993). An experimental evaluation of the critical potential difference inducing cell membrane Electroporabilization. *Biophys J.* 65(1), 409-413.
- [46] Saulis, G. y Saul, R. (2012). Size of the pores created by an electric pulse: microsecond vs millisecond pulses. *Biochim Biophys Acta J.* 1818(12), 3032-3039.
- [47] Kuan, J. et al. (2006). Comparison of ultrasound and electromagnetic field effects on osteoblast growth. *Ultrasound Med Biol.* 32(5), 769-775.
- [48] Caraglia, M. et al. (2005). Electromagnetic fields at mobile phone frequency induce apoptosis and inactivation of the multi-chaperone complex in human epidermoid cancer cells. *J. Cell Physiol.* 204(2), 539-548.
- [49] Stacey, M. et al. (2011). Nanosecond pulsed electric field induced cytoskeleton, nuclear membrane and telomere damage adversely impact cell survival. *Bioelectrochemistry* 82(2), 131-134.
- [50] Pliquett, U. et al. (2007). High electrical field effects on cell membranes. *Bioelectrochemistry* 70(2), 275-282.
- [51] Clapham, D. (2007). Calcium Signaling. *Cell.* 131(6), 1047-1058.
- [52] Gámez, J. y Sedeño, A. (2013). Efectividad de la fisioterapia en el abordaje de la fibromialgia. *Revisión bibliográfica. Fisioterapia* 35(5), 224-231.
- [53] Richter, A., Bartoš, M. y Ferková, Ž. (2018). Physical analysis of pulse low-dynamic magnetic field applied in physiotherapy. *Springer Nature* 68(3), 239-245.
- [54] Aldinucci, C. et al. (2000). The effect of pulsed electromagnetic fields on the physiologic behaviour of a human astrocytoma cell line. *Biochim Biophys Acta Mol Cell Res.* 1499(1-2), 101-108.
- [55] Spiller, D. et al. (2010). Measurement of single-cell dynamics. *Nature* 465(7299), 736-745.

Simulación de radio propagación de arreglos de Múltiples-Entradas-Múltiples-Salidas (MIMO) en frecuencias de ondas milimétricas para redes 5G

Javier Enrique Arévalo Peña
Fundación Universidad Autónoma de Colombia, Colombia

La adopción en el mundo y en Colombia después del año 2020 de nuevas tecnologías móviles de quinta generación (5G) para atender el constante incremento de usuarios y la demanda de servicios requiere de estudiar las características que deben poseer los modelos de propagación que se enfoquen al diseño de estas tecnologías inalámbricas especialmente en las frecuencias de ondas milimétricas. En este capítulo se presenta el proceso de simulación de radio propagación de arreglos MIMO masivo de 64 y 128 elementos para las frecuencias de 28, 38 y 60 GHz en un escenario urbano de la ciudad de Bogotá, empleando el software ICS Telecom EV y cartografía digital de alta resolución. Se configuran estaciones base 5G y se escoge el modelo de propagación ITU-R 525/526 para analizar los parámetros de cobertura básica, interferencia y rendimiento. Los resultados muestran que el arreglo MIMO masivo de 128 elementos operando a la frecuencia de 28 GHz evidencia el mejor desempeño en cobertura y rendimiento.

1. INTRODUCCIÓN

Las capacidades de acceso inalámbrico de las redes 5G se extenderán mucho más allá de las anteriores generaciones de comunicaciones móviles, entre las cuales se incluyen básicamente altas velocidades de transmisión de datos, una latencia muy baja, alta fiabilidad, eficiencia energética y un alto número de dispositivos externos [1, 2]. La tecnología clave para ello es la inclusión de equipos a bandas de alta frecuencia, la integración de acceso y red de retorno, la comunicación de dispositivo a dispositivo, comunicaciones dúplex flexibles, el uso adecuado del espectro, el empleo de múltiples antenas de transmisión y la separación de usuario y control de la red [2-4].

Con el fin de apoyar el aumento de la capacidad de tráfico y permitir que el ancho de banda de transmisión necesario pueda soportar muy altas velocidades de datos, las redes 5G ampliarán la gama de frecuencias utilizada para la comunicación móvil [5]. Esto incluye nuevo espectro en bandas de frecuencias superiores a 6 GHz, que permiten una combinación de una mayor capacidad de ancho de banda, baja latencia, y un número exponencial de dispositivos interconectados. Es así, que los sistemas de comunicación inalámbrica de ondas milimétricas ubicados entre los 30 GHz y 300 GHz representan una gran evolución en las comunicaciones actuales [6]. Debido a la potencial disponibilidad de anchos de banda más amplios las frecuencias de ondas milimétricas por encima de los 30 GHz ofrecen la promesa de brindar altas tasas máximas de datos en áreas específicas donde las demandas de tráfico son muy altas [6, 7].

No obstante, las características de propagación de las bandas de ondas milimétricas son muy diferentes de las frecuencias que estas por debajo de 6 GHz [8]. Normalmente las distancias que se pueden lograr son mucho menores y las señales no pasan a través de las paredes y otros objetos en los edificios. Se espera que la comunicación de onda milimétrica se utilice para la cobertura al aire libre para redes densas con rangos máximos de 200 m o 300 m [9, 10]. Adicionalmente, uno de los problemas del uso de señales de onda milimétrica es que también pueden verse afectados por cambios atmosféricos como la lluvia, la niebla, la nieve, entre otros. Esto puede causar una reducción considerable de los niveles de señal y resultar en una disminución de la cobertura durante períodos de tiempo [11].

El espectro específico para la comunicación móvil en las bandas de frecuencia de ondas milimétricas aún está en estudio por la UIT-R o por los organismos reguladores individuales [12]. Numerosos estudios han realizado estudios en diferentes frecuencias de operación de ondas milimétricas de las cuales se ha escogido 28 GHz, 38 GHz y 60 GHz como referencia por ser algunas de las candidatas para la implementación de las futuras redes 5G [13-15].

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Características de las redes 5G

La evolución de las redes móviles ha venido avanzando para dar respuesta a las nuevas necesidades y demandas de comunicación de la sociedad y la constante en estos últimos años de evolución de las tecnologías inalámbricas ha sido poder acceder a aplicaciones y contenidos cada vez más exigentes que por su propia naturaleza y tamaño deben contar con la velocidad de transmisión óptima para su uso a través de comunicaciones seguras, fiables y eficientes en el uso del espectro radioeléctrico y las infraestructuras de red. Así mismo, es importante resaltar que la tecnología 5G abarcará soluciones vinculadas al internet de las cosas, el *big data*, la robótica, la realidad virtual o la retransmisión de la ultra alta definición, debido a que las redes actuales 4G, 3G o 2G no cuentan con el ancho de banda suficiente para la gran cantidad de datos que esos dispositivos transmitirán, incluyendo entre otros: sensores, vehículos, electrodomésticos y robots [16].

Las capacidades de acceso inalámbrico de las redes 5G incluyen básicamente altas velocidades de transmisión de datos, una latencia muy baja, alta fiabilidad, eficiencia energética y la interconexión de un alto número de dispositivos externos. La tecnología clave para ello es la inclusión de equipos a bandas de alta frecuencia, la integración de acceso

y red de retorno, la comunicación de dispositivo a dispositivo, comunicaciones dúplex flexibles, el uso adecuado del espectro, el empleo de múltiples antenas de transmisión y la separación de usuario y control de la red. Algunas de las capacidades más relevantes que estarán presentes en las redes 5G son las siguientes [2, 17]:

- *Capacidad de tráfico mayor.* Se prevé que la demanda de tráfico para sistemas móviles de comunicación continuará aumentando dramáticamente. Para apoyar este tráfico de una manera más accesible, las redes 5G deben entregar los datos con mucho más bajo costo por bit en comparación con las redes que existen hoy en día. Además, el aumento en el consumo de datos dará lugar a un aumento de energía en las redes, por lo tanto, la red 5G debe consumir significativamente menor energía por bit entregado que las redes celulares actuales.
- *Tasas de datos muy altas.* Cada generación de la comunicación móvil se ha asociado con tasas de datos más altas comparadas con la generación anterior. En el pasado, gran parte de la atención se ha centrado en la tasa máxima de transmisión de datos que puede ser apoyado por una tecnología de acceso inalámbrico en condiciones ideales. Sin embargo, una capacidad más importante es la velocidad de datos que realmente se pueden prestar en condiciones de la vida real en diferentes escenarios. La red 5G debe soportar velocidades de datos superiores a 10 Gbps en escenarios específicos, tales como en interiores y ambientes al aire libre difíciles. Las velocidades de datos de 100 Mbps deberán ser alcanzables en zonas urbanas y ambientes suburbanos y las velocidades de datos de al menos 10 Mbps deben ser accesibles en casi todas partes, incluyendo zonas rurales pobladas en países desarrollados y en desarrollo.
- *Latencia muy baja.* Esta característica será impulsada por la necesidad de soportar nuevas aplicaciones, tales como la seguridad y el control de los procesos críticos de infraestructura y de la industria ya que pueden requerir una latencia mucho más baja en comparación con el servicio móvil de comunicaciones ofrecido en los sistemas móviles actuales.
- *Alta confiabilidad y disponibilidad.* La confiabilidad será un factor supremamente importante debido a que habrá millones de dispositivos que estarán conectados a la red 5G, la cual deberá transportar los paquetes de datos con una latencia muy baja y con una muy alta probabilidad de entrega, debido a que estos datos pueden ser críticos como en aplicaciones médicas o en emergencias de infraestructuras de edificaciones. Así mismo, la disponibilidad deberá ser un factor igualmente importante ya que se debe brindar una buena calidad de servicio para las aplicaciones que se tengan provistas prestar en las zonas de cobertura de la red 5G.
- *Bajo costo en los dispositivos y disminución del consumo de energía.* Los dispositivos móviles de bajo costo y baja energía han sido un requisito clave del mercado desde los primeros días de las comunicaciones móviles. Se espera que los dispositivos 5G como sensores y actuadores estén disponibles a un costo muy bajo y con una duración de batería de varios años sin necesidad de recargar.

Finalmente, es importante recordar que cada vez que una tecnología nueva es estudiada e implementada trae consigo muchas mejoras y beneficios. A continuación, se presenta algunos de los servicios que se podrían brindar en las redes móviles 5G [2, 18]:

- *Control de vehículos autónomos.* Esta tendencia emergente tiene varios impactos sobre la sociedad como asistencia en casos de emergencia y beneficios como control de tráfico seguro y prevención de accidentes. Se requieren comunicaciones vehículo a infraestructura, vehículo a vehículo, vehículo a personas y vehículo a sensores y las comunicaciones deben proveer baja latencia y confiabilidad para una operación segura.
- *Comunicaciones de emergencia.* En situaciones de emergencia es crucial para el usuario contar con una red confiable para rescates y salvamento, aun si parte de la red es dañada en los desastres. Los dispositivos de los usuarios pueden emplearse para retransmitir y dar soporte a otros dispositivos para realizar conexión con otras partes de la red que aun estén en funcionamiento. De tal forma, que los dispositivos deberán tener alta disponibilidad y eficiencia de energía como requerimientos críticos en comunicaciones de emergencia.
- *Eventos masivos al aire libre y estadios.* Algunos eventos que ocurren temporalmente en ciertas áreas al aire libre y en estadios, como conciertos, festivales, competencias deportivas, entre otros, pueden ser visitados por una cantidad significativa de personas en un tiempo determinado demandando alto volumen de tráfico. Se requiere dimensionar la red para soportar múltiples usuarios por kilómetro cuadrado de tal manera que se provea suficiente rendimiento para la alta transmisión de datos como videos y fotografías de alta resolución en eventos masivos.
- *Examen y cirugía remota.* Los exámenes médicos y las cirugías a un paciente tienen el potencial de efectuarse remotamente. Para esto la comunicación inalámbrica debe tener muy baja latencia y ser ultra confiable para los servicios críticos de salud y proporcionar información precisa de las sensaciones y las interacciones táctiles en el caso de las cirugías remotas.

- *Centros comerciales.* En los grandes centros comerciales los usuarios están en la búsqueda de diferentes tipos de servicios personalizados. Se debe asegurar que la red proporcione una comunicación altamente disponible y segura para servicios sensibles como las transacciones financieras.
- *Ciudades inteligentes.* La conectividad que se provee entre las personas será extendida en el futuro con el ambiente que le rodea a fin de proveer servicios que son personalizados. Además, la conectividad con los objetos será un factor importante para proporcionar los servicios inteligentes. Esta amplia gama de servicios requerirá altas tasas de transmisión de datos y baja latencia para los pequeños dispositivos, sensores y actuadores que tendrán aplicaciones en contextos como casas inteligentes y edificios inteligentes.
- *Teleprotección en redes inteligentes.* Las redes inteligentes como las relacionadas con electricidad, gas o agua, deben ser capaces de reaccionar a cambios en el uso del servicio para evitar fallas masivas con un potencial impacto crítico en la sociedad. Las aplicaciones de teleprotección requieren muy baja latencia y alta confiabilidad para garantizar alta seguridad e integridad en la infraestructura de redes inteligentes.
- *Realidad virtual y aumentada.* Una alta tasa de datos y una baja latencia son requeridos para permitir la realidad virtual y aumentada. Los usuarios conectados entre sí requieren intercambiar gran cantidad de información en tiempo real a través de los sensores y la red para mantener una calidad en la interacción de alta resolución.

2.2 Ondas milimétricas

Los requisitos de espectro para el uso de las redes 5G surgen principalmente de la combinación del aumento previsto en las demandas de capacidad de tráfico y el soporte para nuevos casos de uso que estarán habilitados para todo el entorno de 5G. Los requisitos técnicos de 5G para dar soporte a los casos de uso (por ejemplo, una tasa de datos máxima mayor a los 10 Gbps, tasa de datos en el borde de la celda de 100 Mbps y latencia de 1 ms de extremo a extremo) potencialmente podrán lograrse en una variedad de frecuencias de operación. De esta manera, los sistemas 5G en el futuro tendrán una amplia gama de requisitos para diferentes servicios [19, 20].

La banda de ondas milimétricas, ubicada entre los 30 GHz y los 300 GHz, provee una gran expansión de espectro radioeléctrico, siendo una parte esencial de la siguiente revolución de redes 5G. No obstante, las comunicaciones de ondas milimétricas tienen algunas características de propagación que necesitan considerarse y estudiarse, como las pérdidas por propagación atribuibles a las condiciones atmosféricas, las dificultades de difracción alrededor de los obstáculos y la baja capacidad de penetración [20]. Su aplicabilidad de un modelo depende de varios factores incluyendo el tipo de terreno, el ambiente de propagación, las características atmosféricas, las propiedades eléctricas del suelo, y el tipo de materiales de las construcciones urbanas, entre otros [21, 22].

Es de resaltar que las frecuencias de ondas milimétricas tienen un potencial de más de 100 GHz de espectro disponible para comunicaciones de banda ancha. El espectro radioeléctrico específico para la comunicación móvil en las bandas de frecuencia de ondas milimétricas aún está en estudio por la UIT-R o por los organismos reguladores individuales, entre los cuales se tiene la propuesta de opciones de licenciamiento para las siguientes bandas [13].

- *Bandas de 24 GHz:* 24.25-24.45 GHz y 25.05-25.25 GHz.
- *Banda LMDS:* 27.5-28.35 GHz, 29.1-29.25 GHz, y 31-31.3 GHz.
- *Banda de 39 GHz:* 38.6-40 GHz.
- *Bandas de 37/42 GHz:* 37.0-38.6 GHz y 42.0-42.5 GHz.
- *Bandas de 60 GHz:* 57-64 GHz y 64 -71 GHz.
- *Bandas de 70/80 GHz:* 71-76 GHz, 81-86 GHz, 92-95 GHz.

Así mismo, numerosos estudios han realizado estudios en diferentes frecuencias de operación de ondas milimétricas de las cuales se ha escogido 28 GHz, 38 GHz y 60 GHz como referencia por ser algunas de las candidatas para la implementación de las futuras redes 5G [23, 24].

3. MÉTODO

3.1 Herramienta de simulación ICS Telecom EV y cartografía digital

ICS Telecom EV es una herramienta de simulación de radio propagación de la empresa francesa Advanced Topographic Development & Images (ATDI). Permite realizar estudios y comprobar parámetros técnicos de las principales tecnologías inalámbricas del momento. Opera satisfactoriamente entre en el rango de frecuencias de 30MHz a 450 GHz. Se utiliza sobre cualquier cartografía que se encuentre disponible o que haya sido elaborada para fines específicos [25, 26].

ICS Telecom EV funciona por capas. Cada capa proporciona diferentes elementos relacionados con la cartografía y con los parámetros de simulación. Por lo general existe un tipo de archivo asociado con cada capa: los archivos de extensión *.GEO proporcionan la descripción altimétrica del terreno; los archivos de extensión *.SOL contienen información del tipo de zonas dentro del mapa (clutter) con valores específicos de atenuación; los archivos de extensión *.PAL son archivos con la paleta de colores del mapa esenciales para mostrar la imagen; los archivos con extensión *.FLD almacena los resultados de la cobertura y de la interferencia simulados; los archivos con extensión *.EWF guardan la configuración de la red y su cobertura asociada; y los archivos con extensión *.VEC contienen la información de todos los objetos vectoriales generados por la simulación o por el usuario [26-28].

La cartografía de la ciudad de Bogotá disponible para las simulaciones es un Modelo Digital de Ciudad (Digital City Model DCM), tiene alta resolución con una precisión de 5 m y el terreno y la altura de los edificios se modelan en la misma capa con un archivo *.GEO. El tipo de terreno es establecido por un archivo *.SOL. Para el cálculo de la cobertura radioeléctrica utilizando ICS Telecom EV, la zona se cuadrícula en píxeles de 5m x 5m (cartografía digital) y se observa el valor de la señal en cada píxel, haciendo una representación de los distintos niveles según un código de colores [28].

3.2 Escenario de simulación y configuración de estaciones base 5G

Para el caso específico de este proyecto, la zona de trabajo está ubicada en el centro histórico de la ciudad de Bogotá D. C., presentada en la Figura 1, escogida por la alta densidad de usuarios móviles y por lo tanto, tráfico de red. Comprende el área delimitada por la Carrera 3 hasta la Carrera 10 y la Calle 19 hasta la Calle 8, con una cobertura total de 1.353 Km². Es de notar, que se emplea sectorización a 120°, es decir, se cuenta con 21 estaciones transmisoras que se configuran con parámetros de tecnología de redes 5G. Para establecer el diseño de la red de estaciones base, se parte de su ubicación real dentro de la zona de estudio. Se realiza un levantamiento en campo enfocado a ubicar las estaciones base de los operadores celulares. El levantamiento efectuado fue apoyado en las indicaciones aportadas por ingenieros de soporte de empresas operadoras de telefonía móvil celular sobre las características propias de las estaciones base, lo que dio como resultado las ubicaciones mostradas en la Figura 1.



Figura 1. Zona de Estudio Barrio La Candelaria

En la Tabla 1 se presentan los principales parámetros utilizados en la simulación con la tecnología 5G. Los siguientes son los principales parámetros utilizados en la simulación con la tecnología 5G [28, 29].

Tabla 1. Parámetros Simulación Estaciones Base 5G

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión	10 W
Ganancia de antena	18 dBi
Arreglo MIMO Masivo	64 elementos y 128 elementos
Frecuencia de operación	28 GHz, 38 GHz y 60 GHz
Ancho de banda de canal	100 MHz
Modulación	64 QAM
Máximo DL	1 Gbps
Máximo UL	0.5 Gbps

- *Potencia Tx.* Potencia de transmisor de la estación base 5G.
- *Ganancia de Antena Estación Base.* Ganancia proporcionada por la antena Tx/Rx.
- *Pérdida de Cable de la Estación Base.* Atenuación por los cables de la estación base desde las antenas al receptor, incluyendo acopladores y multiplexores.
- *Potencia Radiada Isotrópica Efectiva (EIRP).* Potencia de transmisión de la estación base menos cualquier pérdida de cable y ganancia de antena efectiva.
- *Frecuencia Portadora.* Frecuencia escogida como referencia de operación en la banda de onda milimétrica para 5G.
- *Ancho de Banda de Canal.* Ancho de banda establecido para la tecnología 5G.
- *Modulación.* Tipo de modulación escogido para la tecnología 5G.

- *Razón de Transmisión de Datos en el Enlace de Bajada (DL)*. Capacidad de transmisión de información en el enlace desde la estación base hacia el área de los móviles.
- *Razón de Transmisión de Datos en el Enlace de Subida (UL)*. Capacidad de transmisión de información en el enlace desde el área de los móviles a la estación base.

3.3 Modelos de propagación

El software ICS Telecom EV ofrece una amplia gama de opciones de modelos de propagación que permite a sus usuarios escoger entre modelos determinísticos, estadísticos y mixtos como se ha indicado anteriormente, incluso, permite a sus usuarios componer esquemas de propagación, mediante la combinación de diferentes componentes disponibles en ICS Telecom EV [29].

Para el caso de las frecuencias de operación escogidas de 28 GHz, 38 GHz y 60 GHz se escoge el modelo de propagación ITU-R 525/526, único dentro de ICS Telecom EV que soporta la simulación para estas frecuencias y se acompaña con el modelo Delta Bullington como ajuste de geometría de difracción y del modelo Delta Bullington como ajuste de atenuación por subtrayectoria [30, 31]. De igual forma, se cuenta con las recomendaciones ITU-R 676, ITU-R 840, ITU-R 838 e ITU-R 530 para registrar el efecto de las condiciones atmosféricas [32-34]. Estos valores los establece ICS Telecom EV teniendo en cuenta la situación geográfica del país según datos de referencia proporcionados por defecto de sus bases de datos internas y la información del IDEAM disponible para zona de Bogotá [35].

3.4 Parámetros de simulación

A continuación, se describen los tipos de simulación dentro del programa ICS Telecom EV que se utilizan para realizar el estudio de radio propagación del sistema 5G, los cuales se enfocan en simulaciones de cobertura básica, simulaciones SNIR (Signal to Noise and Interference Ratio) y simulaciones de rendimiento (Throughput) [36]. Las simulaciones de cobertura básica presentan la intensidad de campo de la señal de referencia, uno de los parámetros más importantes en términos de cobertura, esta es la intensidad absoluta de la señal 5G referenciada en dBm.

Las simulaciones SNIR son simulaciones de interferencia. Debido a que la señal recibida está variando constantemente y está expuesta a contaminaciones. El cálculo del SNIR se puede realizar mediante distribuciones de probabilidad y generalmente se expresa en dB. Al incrementar el SNIR decrece la probabilidad de que la transmisión falle. El desempeño del sistema es una combinación de dos aspectos el BER (Bit Error Rate) y el SNIR, ya que al incrementar el SNIR decrece el valor del BER. El análisis de interferencia SNIR se enfoca en los resultados de las simulaciones, siendo en todos los casos considerados adecuados valores elevados de este parámetro como un desempeño satisfactorio del sistema [37]. En los resultados se pueden definir varios niveles de calidad de SNIR según el porcentaje de tiempo en el cual no se alcanza un nivel determinado de SNIR, es decir, se está por fuera de ese valor. Luego, no se puede establecer el nivel de servicio específico y hay pérdida del mismo. Los tiempos de pérdida de servicio pueden ser calculados basados en distribuciones de señal e interferencia, que generalmente son constantes para una red y que pueden ser aproximados por distribuciones gaussianas [37, 38]. En general se pueden tomar las siguientes referencias:

- Si el valor de SNIR es menor a 10 dB, puede haber una pérdida de servicio de más del 70%.
- Si el valor de SNIR está entre 10 dB y 15 dB las pérdidas del servicio estarán entre 70% y el 20%.
- Si el valor de SNIR es mayor a 15 dB las pérdidas del servicio serán menores al 20%.

Finalmente, las simulaciones de Throughput denotan el desempeño del sistema 5G en la capacidad de información que puede ofrecerse a los usuarios (Kbps) [38].

4. RESULTADOS

4.1 Simulaciones de cobertura básica

En la Figura 2 se presenta el mapa de cobertura básica para 64 elementos.

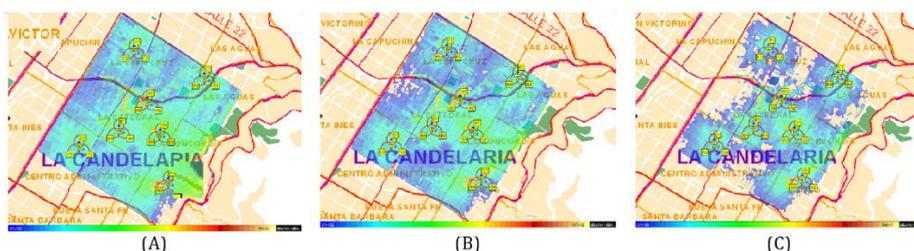


Figura 2. Mapa de cobertura básica MIMO Masivo 64 elementos (A) 28 GHz, (B) 38 GHz, (C) 60 GHz

En la Figura 3 el mapa de cobertura básica para 128 elementos en las frecuencias de 28 GHz, 38 GHz y 60 GHz.

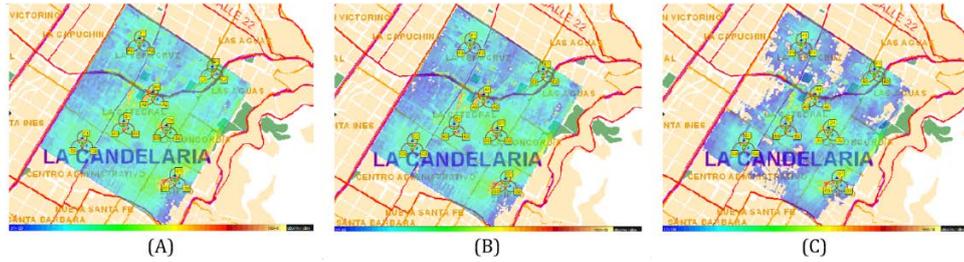


Figura 3. Mapa de cobertura básica MIMO Masivo 128 elementos (A) 28 GHz, (B) 38 GHz, (C) 60 GHz

4.2 Simulaciones de interferencia (SNIR)

En la Figura 4 se presenta la cobertura SNIR para 64 elementos, y en la Figura 5; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para la antena de 128 elementos.

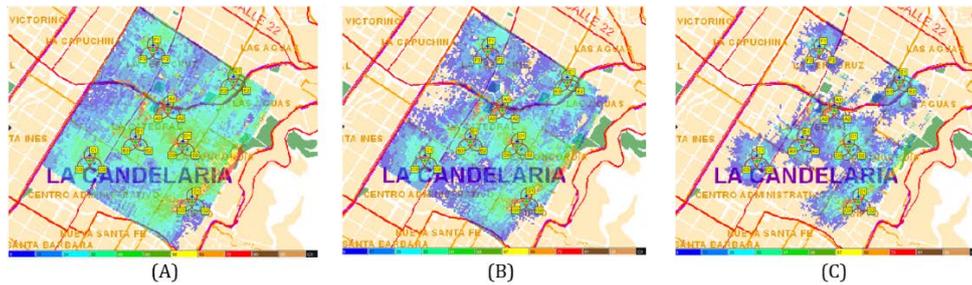


Figura 4. Mapa de cobertura SNIR MIMO Masivo 64 elementos (A) 28 GHz, (B) 38 GHz, (C) 60 GHz

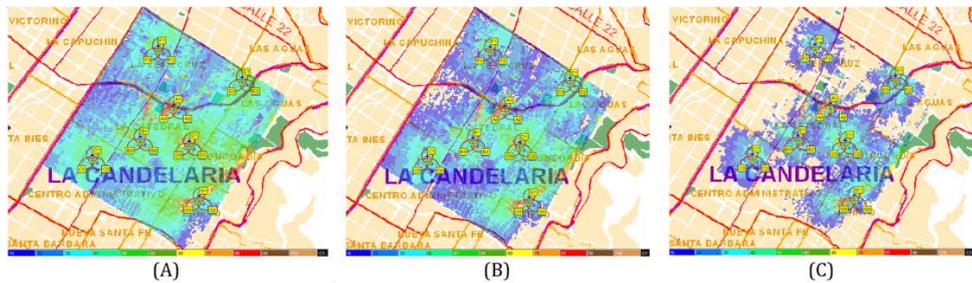


Figura 5. Mapa de cobertura SNIR MIMO Masivo 128 elementos (A) 28 GHz, (B) 38 GHz, (C) 60 GHz

4.3 Simulaciones de rendimiento (Throughput)

En la Figura 6 se presenta la cobertura *Throughput* para 64 elementos, y en la Figura 7 para la antena de 128 elementos.

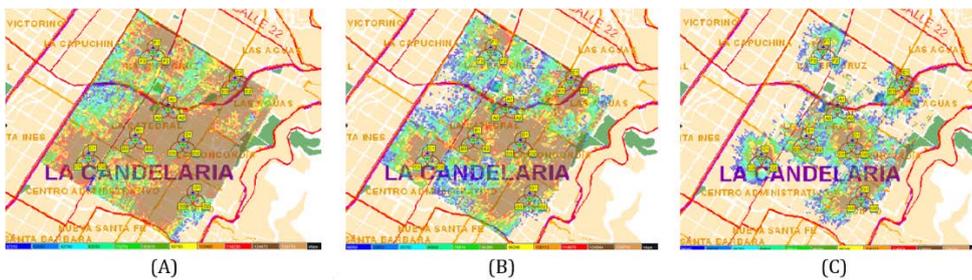


Figura 6. Mapa de cobertura *Throughput* MIMO Masivo 64 elementos (A) 28 GHz, (B) 38 GHz, (C) 60 GHz

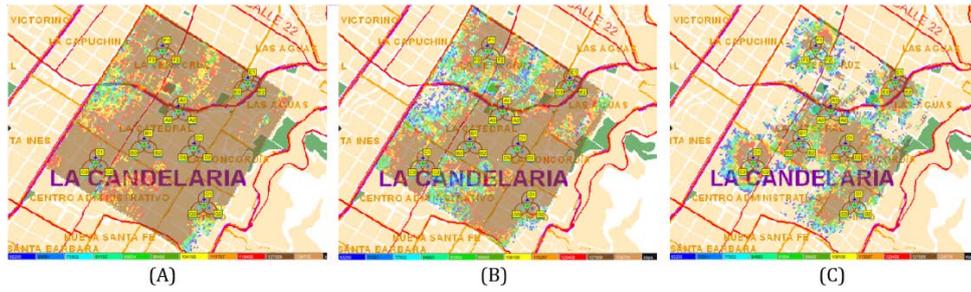


Figura 7. Mapa de cobertura *Throughput* MIMO Masivo 128 elementos (A) 28 GHz, (B) 38 GHz, (C) 60 GHz

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Resultados simulaciones de cobertura básica

En la Figura 8 se presenta las grafica comparativa de los resultados de la antena de 64 elementos y en la Figura 9 de la antena de 128 elementos.

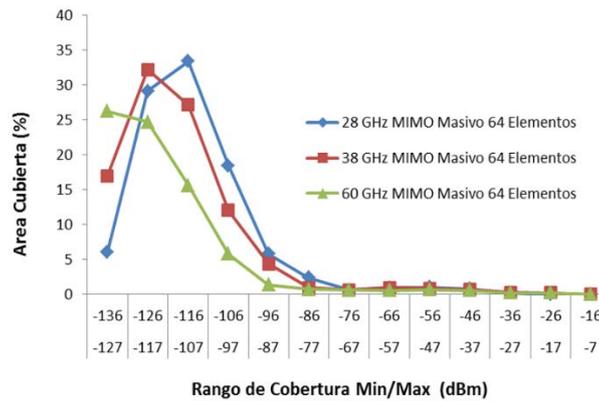


Figura 8. Comparación de cobertura básica MIMO Masivo de 64 elementos

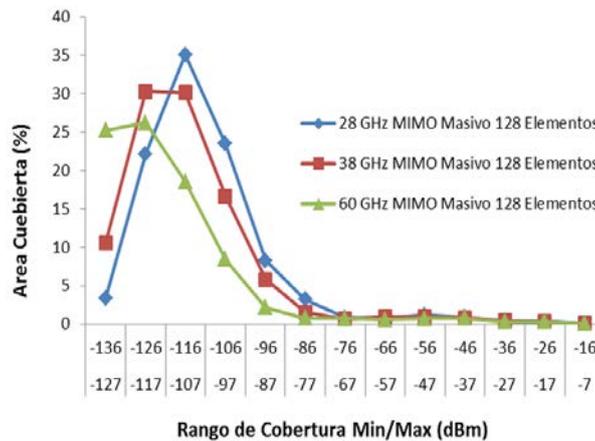


Figura 9. Comparación de cobertura básica MIMO Masivo de 128 elementos

El comportamiento de cobertura con 64 elementos se concentra con valores significativos hasta desde -127 dBm hasta -86 dBm en las frecuencias de estudio, manifestándose una cobertura con mayores niveles en 28 GHz con el 95,6%, seguido de 38 GHz con el 93,77% y finalizando con 60 GHz con el 74,53%. Así mismo, el comportamiento de cobertura con 128 elementos se concentra con valores significativos hasta desde -127 dBm hasta -86 dBm en las frecuencias de estudio, manifestándose una cobertura con mayores niveles en 28 GHz con el 95,43%, seguido de 38 GHz con el 94,44% y finalizando con 60 GHz con el 81,27%.

5.2 Resultados simulaciones de interferencia (SNIR)

En la Figura 10 se presenta la gráfica comparativa de los resultados de cobertura SNIR de la antena MIMO Masivo de 64 elementos, y en la Figura 11 de la antena MIMO Masivo de 128 elementos.

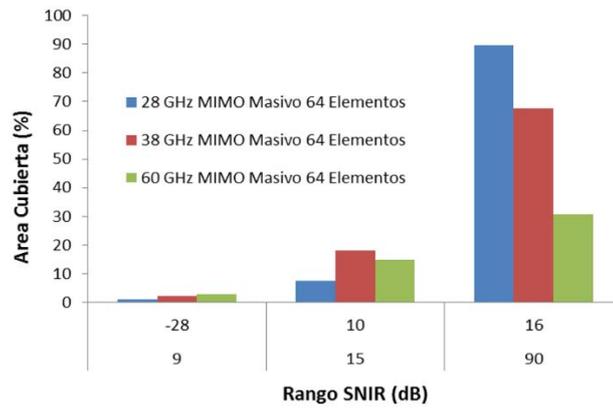


Figura 10. Comparación de cobertura SNIR MIMO Masivo de 64 elementos

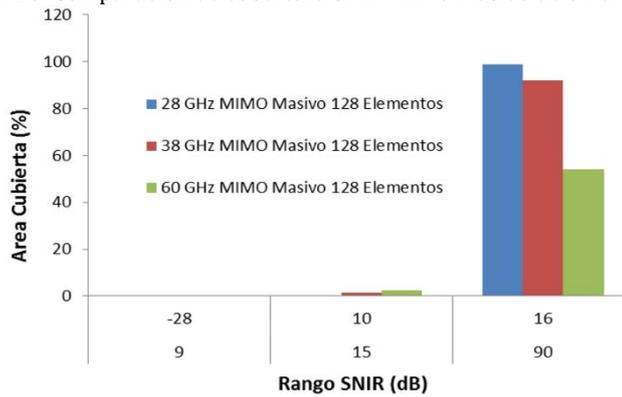


Figura 11. Comparación de cobertura SNIR MIMO Masivo de 128 elementos

Para la antena de 64 elementos se observa que, entre 16 dB y 90 dB, donde se espera que las pérdidas de servicio sean menores al 20%, en la frecuencia de 28 GHz el área cubierta SNIR es de 89,71%, en la frecuencia de 38 GHz es de 67,78% y para la frecuencia de 60 GHz es del 30,81%. Mientras que para los valores de -28 dB a 15 dB, donde puede haber pérdidas de servicio son mayores al 20% el área cubierta SNIR para la frecuencia de 28 GHz es 8,71%, en la frecuencia de 28 GHz es de 20,61% y para la frecuencia de 60 GHz es de 17,75%. En cuanto a la antena de 128 elementos, se muestra que, entre 16 dB y 90 dB, para la frecuencia de 28 GHz el área cubierta SNIR es de 98,71%, para la frecuencia de 38 GHz es de 92,20% y para la frecuencia de 60 GHz es de 54,00%. En cuanto a los valores que están entre -28 dB y 15 dB, el área cubierta SNIR para la frecuencia de 28 GHz es de 0,47%, para la frecuencia de 38 GHz es de 1,56% y para la frecuencia de 60 GHz es de 2,58%.

5.3 Resultados simulaciones de rendimiento (*Throughput*)

En la Figura 12 se presenta la cobertura de rendimiento para la antena MIMO Masivo de 64 elementos, y en la Figura 13 para la antena MIMO Masivo de 128 elementos.

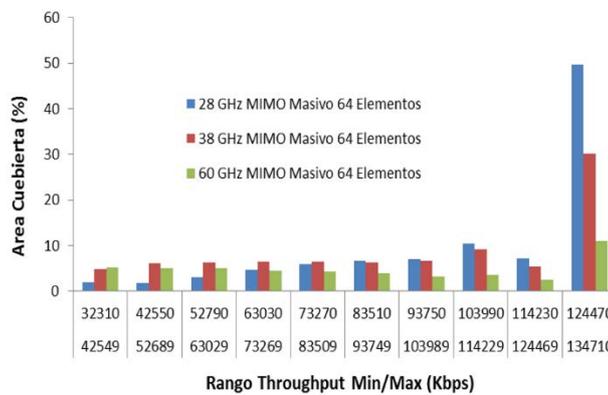


Figura 12. Comparación de cobertura *Throughput* MIMO Masivo de 64 elementos

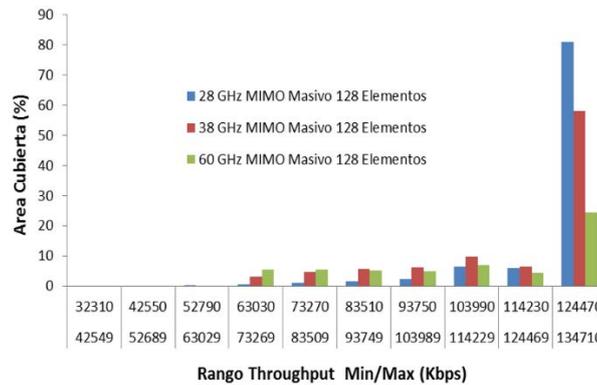


Figura 13. Comparación de cobertura *Throughput* MIMO Masivo de 128 elementos

Para la antena de 64 elementos para valores de rendimiento aproximados entre 100 Kbps a 135 Kbps, para la frecuencia de 28 GHz el área cubierta es de 74.28%, para la frecuencia de 38 GHz el área cubierta es de 51.64% y para la frecuencia de 60 GHz el área cubierta es de 20.40%. En cuanto a la antena de 128 elementos, para la frecuencia de 28 GHz el área cubierta es de 95.66%, para la frecuencia de 38 GHz el área cubierta es de 80.43% y para la frecuencia de 60 GHz es de 40.66%.

6. CONCLUSIONES

La herramienta de simulación ICS Telecom EV permitió realizar todos los ajustes necesarios para efectuar los estudios de radio propagación sobre las redes 5G sobre cartografía digital de alta resolución en frecuencias de operación de ondas milimétricas. Es así, que resulto lo suficientemente robusta y confiable para presentar los resultados del proyecto de investigación.

Los resultados de las simulaciones de cobertura en las frecuencias estudiadas muestran un comportamiento similar en los valores destacándose mayor cobertura en la frecuencia de 28 GHz para los sistemas MIMO Masivo de 64 elementos y 128 elementos. De igual forma, las simulaciones de interferencia presentan un comportamiento favorable para la frecuencia de 28 GHz sobre las demás frecuencias en valores donde las pérdidas de servicio serán menores al 20%. Finalmente, en las simulaciones de rendimiento la frecuencia de 28 GHz también tiene un mejor desempeño en cobertura sobre las demás frecuencias entre 100 Kbps a 135 Kbps.

En cuanto al número de elementos de antena, los sistemas MIMO Masivo de 128 elementos presentan mejor desempeño de cobertura frente a los sistemas de 64 elementos en todas las simulaciones en las frecuencias de estudio. De tal forma que la configuración de mejor desempeño de radio propagación es la frecuencia de 28 GHz con una configuración MIMO Masivo de 128 elementos.

Finalmente, como trabajos futuros se propone continuar con el estudio de modelos de radio propagación que puedan ser aplicados a las redes móviles 5G. Así mismo, verificar el desempeño de los modelos de radio propagación en diferentes bandas de frecuencias de ondas milimétricas para establecer sus ventajas y limitaciones especialmente en ambientes locales es sustancial continuar con otras etapas que ayuden a afianzarlos y a mejorarlos de manera óptima.

Agradecimientos

El autor agradece la Sistema Unificado de Investigaciones (SUI) de la Fundación Universidad Autónoma de Colombia (FUAC) por el apoyo para la presentación de los resultados de investigación y a la Coordinación de Programa de Ingeniería Electrónica y a la Facultad de Ingeniería por su interés en apoyar las actividades de investigación en el área de telecomunicaciones en la FUAC.

REFERENCIAS

- [1] 5G Américas. (2015). 5G Technology Evolution Recommendations. Recuperado: <https://www.5gamericas.org/white-papers/>.
- [2] Osseiran, A., Monserrat, J. y Marsch, P. (2016). 5G Mobile and Wireless Communications Technology. Cambridge University Press.
- [3] Ericsson. (2017). 5G Radio Access: Capabilities and Technologies. Recuperado: www.ericsson.com.
- [4] METIS. (2013). Scenarios, Requirements and KPIs for 5G Mobile and Wireless System.
- [5] Bai, T. et al. (2014). Coverage and capacity of millimeter-wave cellular networks. IEEE Communications Society 52, 70-77.
- [6] Rappaport, T. et al. (2015). Millimeter wave wireless communications. Prentice Hall.
- [7] Dehos, C. et al. (2014). Millimeter-wave access and backhauling: The solution to the exponential data traffic increase in 5G Mobile Communications Systems. IEEE Communications Magazine 52, 88-95.
- [8] Rappaport, T. (2009). Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice Hall.
- [9] Qiao, J. et al. (2015). Enabling device-to-device communications in millimeter-wave 5G cellular networks. IEEE Communications Magazine 53, 209-215.

- [10] Wang, P. et al. (2015). Multi-gigabit millimeter waves wireless communications for 5G: From fixed access to cellular networks. *IEEE Communications Magazine* 53, 168-178.
- [11] Rappaport, T., Sun, S. y Shafi, M. (2015). 5G Channel Model with Improved Accuracy and Efficiency in mmWave Bands. Recuperado: https://futurenetworks.ieee.org/images/files/Tech_Focus_Articles/PDFs/5G-Channel-Model-FINAL.pdf
- [12] Rappaport, T. et al. (2017). Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks - With a focus on propagation models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 65, 6213-6230.
- [13] 5G Américas. (2015). 5G Spectrum Recommendations. Recuperado: <https://www.5gamericas.org/white-papers/>.
- [14] METIS. (2015). METIS Final Project Report. Recuperado: https://metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D8.4_v1.pdf.
- [15] Sulyman, A. et al. (2014). Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz Millimeter-Wave Bands. *IEEE Communications Magazine* 52, 78-86.
- [16] Soldani, D. y Manzalini, A. (2015). Horizon 2020 and Beyond: On the 5G Operating System for a True Digital Society. *IEEE Vehicular Technology Magazine* 10, 32-42.
- [17] Barrera, K., Rozo, D. y Arévalo, J. (2017). Comparación de simulaciones de radiopropagación en frecuencias de ondas milimétricas para redes móviles de quinta generación (5G). *Desarrollo e Innovación en Ingeniería* 23, 45-67.
- [18] Ericsson. (2017). The 5G Business Potential. Recuperado: www.ericsson.com.
- [19] Suater, M. (2013). From GSM to LTE: An Introduction for mobile networks and mobile broadband. Wiley.
- [20] Taori, R. y Sridharan, A. (2015). Point-to-multipoint in-band mm wave backhaul for 5G Networks. *IEEE Communications Society*, 53(1), 195-201.
- [21] Bai T., Alkhateeb, A. y Heath, R. (2014). Coverage and capacity of millimeter-wave cellular networks. *IEEE Communications Society* 52, 70-77.
- [22] Lee, W. (2010). *Wireless and Cellular Telecommunications*. McGraw-Hill.
- [23] Sulyman, A. et al. (2014). Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands. *IEEE Communications Magazine* 52, 78-86.
- [24] Rappaport, T. et al. (2017). Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks - With a focus on propagation models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 65, 6213-6230.
- [25] Missud, P. (2013). *ICS Telecom Reference Manual*. ATDI.
- [26] ATDI. (2014). *ICS Telecom: The Most Complete and Cost-Effective Radio Planning Tool*. ATDI.
- [27] ATDI. (2017). *Manual de inicio de ICS Telecom EV*. ATDI.
- [28] ATDI. (2017). *Realize the Promises of 5G Technology*. ATDI.
- [29] ATDI. (2014). *Radio Propagation in ICS Telecom*. ATDI.
- [30] UIT-R. (1994). Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recuperado: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/es>.
- [31] UIT-R. (2013). Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recuperado: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526/es>.
- [32] UIT-R. (2015). Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa. Recuperado: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530/es>.
- [33] UIT-R. (2005). Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción. Recuperado: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/es>.
- [34] UIT-R. (2013). Atenuación debida a las nubes y a la niebla. Recuperado: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.840/es>.
- [35] IDEAM. (2014). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. Recuperado: <http://www.ideam.gov.co/documents>.
- [36] Arévalo, J. (2016). Radio propagación en Redes 4G-LTE simulación de modelos para sistemas multiantena MU-MIMO. En *Encuentro Nacional de Investigación y Desarrollo*. Bogotá, Colombia.
- [37] Korowajczuk, L. (2011). *LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*. Wiley.
- [38] Kreher, R. y Gaenger, K. (2011). *LTE Signaling: Troubleshooting and Optimization*. Wiley.

Comparación del desempeño de un Controlador Adaptativo por Modelo de Referencia y un Controlador Proporcional, Integral y Derivativo PID clásico, en el control de un convertidor DC-DC reductor

Martín Medina-Sánchez¹

Marjorie Naranjo²

Jesús Rodríguez-Flores²

¹Escuela Politécnica Nacional

²Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Ecuador

El presente trabajo tiene como objetivo comparar el desempeño de un controlador adaptativo por modelo de referencia y un PID para un convertidor reductor de tipo *buck*. El trabajo comienza con un análisis de la dinámica de la planta del convertidor y se plantea un modelo aproximado de segundo orden. Se muestra la metodología para el diseño de un controlador adaptativo por modelo de referencia para la planta de segundo orden en tiempo continuo, tomando en cuenta las características de desempeño planteadas por el modelo de referencia. Mediante simulación se optimizaron los parámetros del controlador adaptativo. Para la implementación práctica y simulación el controlador fue discretizado utilizando el método del retenedor de orden cero. De igual manera se diseñó el controlador PID clásico usando la técnica de cancelación de polos y ceros, posteriormente fue discretizado. Para la codificación e implementación práctica de los controladores ha sido escogido el microcontrolador dsPIC30F4011. La metodología de investigación utilizada fue la empírico-analítica. El desempeño de los controladores fue evaluado mediante los parámetros de la respuesta al escalón: tiempo de subida, tiempo de establecimiento y sobreimpulso; así como el comportamiento de los controladores frente al cambio de la resistencia de carga. Se determinó que el controlador PID reacciona de mejor manera ante el cambio de parámetros de la planta, siempre y cuando se mantenga el punto de consigna. Por último, se recomienda una investigación para implementar en paralelo los dos controladores y así sumar sus beneficios.

1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores electrónicos de potencia se encuentran presentes en la mayoría de dispositivos electrónicos modernos, desde los convencionales cargadores de celulares hasta en aplicaciones en las que se exige mayores prestaciones en cuanto a potencia eléctrica entregada y calidad en el voltaje de salida, como las fuentes de computadores. El rápido desarrollo tecnológico de Latinoamérica exige nuevas tecnologías más eficientes y amigables con el medio ambiente. Esto ha incentivado la creación de nuevas líneas de investigación en ámbitos técnicos y tecnológicos, para cambiar la limitante situación de ser compradores de tecnología por la de productores. Es por ello que es necesario implementar controladores que incrementen la eficiencia de las fuentes electrónicas de potencia.

Los convertidores de potencia ha sido un tema de amplio estudio. Existen trabajos que abordan la temática de la construcción de fuentes conmutadas [1], así como temáticas relacionadas con el control de las misma. Se han usado técnicas de control inteligente como algoritmos genéticos aplicadas a la optimización de controladores [2], técnicas de control que tienen muy bajo coste, como el control por histéresis [3], que es implementado mediante electrónica analógica en la que se define una banda en la cual deberá permanecer el voltaje de salida para su correcto funcionamiento. También hay fuentes conmutadas que funcionan con controladores PI cuyo rendimiento es bastante aceptable y tiene un bajo costo de implementación.

A nivel de Latinoamérica también se han formulado trabajos en la misma línea de investigación donde se analiza el modelo híbrido del convertidor [4], técnicas de control difuso [4], técnicas de control digital [5], entre otros. En Ecuador se han realizado otras investigaciones que toman por objeto de estudio técnicas de control de los convertidores tipo *buck* [6], *buck-boost* [7]. También existen trabajos de investigación cuya temática es la implementación de cargadores de baterías [8], [9].

Existen diferentes tipos de fuentes de potencia, tanto para reducir el voltaje de entrada, como para aumentarlo. Los convertidores reductores de voltaje encargados de reducir el voltaje de entrada, también llamados *buck*, sirven como dispositivos para regular el voltaje de salida a un nivel deseado, siempre y cuando éste sea menor que el voltaje de entrada. Las fuentes reductoras poseen elementos capacitivos e inductivos, lo que le dan a la planta del convertidor una dinámica de segundo grado.

El problema de este tipo de plantas radica en que pueden existir sobrepasos o sobreimpulsos, en una fuente reductora los sobrepasos se ven afectados por el cambio del tipo de carga o la variación de la impedancia de la misma. Este comportamiento no deseado puede causar daños en los equipos electrónicos más sensibles. El principio de funcionamiento de un convertidor *buck* es el de una fuente conmutada, que cambia su entrada de un estado a otro, cambiando la estructura de la planta en cada operación de conmutación. Las frecuencias de conmutación típicamente se encuentran en el rango de los kilohertz. Los controladores electrónicos actuales necesitan cumplir con altos estándares en cuanto a al tiempo de establecimiento y la calidad del voltaje de salida. Debido al constante desarrollo de los microcontroladores, se ha mejorado notablemente la capacidad de cómputo, permitiendo la aplicación de

algoritmos de control relativamente complejos, que en décadas anteriores eran imposibles de ser llevados a la práctica. Es por ello que se propone implementar un controlador adaptativo por modelo de referencia, que será capaz de identificar los cambios en los parámetros de la planta y ajustar los parámetros del controlador, para poder alcanzar los requerimientos mencionados anteriormente. Los controladores adaptativos son capaces de superar las barreras de las limitaciones de los controladores lineales convencionales, debido a que poseen algoritmos de identificación en línea y reglas de ajuste de sus parámetros.

En el presente trabajo se comparó el desempeño de los dos controladores, PID y controlador adaptativo por modelo de referencia, aplicado al control de una planta DC-DC reductora del tipo *buck*. El trabajo de investigación pretende fortalecer aspectos como el modelamiento matemático de los convertidores reductores, así como un estudio más detallado de su comportamiento haciendo uso de herramientas de software de modelamiento y simulación para poder predecir su comportamiento real. Se tomará otro enfoque del diseño de convertidores de potencia basado en las características de respuesta al escalón unitario, diferente al enfoque de diseño basado en el modo de conducción continua, donde no se toman en cuenta las características de la respuesta transitoria. El trabajo de investigación plantea el diseño de un controlador adaptativo por modelo de referencia más adecuado para la planta, con el objetivo de disminuir el sobrepaso en un convertidor dc-dc reductor y el tiempo de asentamiento frente a una entrada del tipo escalón. Se espera que el controlador pueda lidiar con el cambio del tipo de carga o sus parámetros y tener una respuesta dentro de un rango de lo aceptable.

El control adaptativo es aplicado a sistemas constante de tiempo que permiten la holgura suficiente para proceder a la identificación de sistemas y con ello establecer los parámetros que permitan el cumplimiento del modelo con base al modelo de referencia. No obstante, en el presente trabajo se pretende establecer un compromiso que logre o permita aplicar técnicas adaptativas para cuando se está en presencia de sistemas denominados rígidos de la severa divergencia entre las constantes de tiempo que plantean una limitante matemática y tecnológica, la cual se estudiará y pretenderá resolver el transcurso de trabajo. Esto permitirá utilizar los convertidores de potencia en aplicaciones en las que su carga esté continuamente cambiando. Se puede considerar como cambios en la carga la conexión y desconexión de elementos acoplados a la carga, el cambio de impedancia de la carga debido a variaciones de temperatura entre otros factores.

2. MÉTODO

2.1 Convertidor DC-DC reductor

Las fuentes conmutadas son dispositivos electrónicos que se encargan de transformar de un tipo de energía a otro mediante el uso de dispositivos semiconductores de potencia. En general, existen tres diferentes tipos de fuentes conmutadas: elevadores, reductores y elevadores-reductores [10]. Desde la invención de conmutadores electrónicos de alta velocidad, los convertidores electrónicos han solucionado una gran cantidad de problemas. El avance de la tecnología permite elevar el rendimiento de los convertidores.

Los convertidores se usan ampliamente en sistemas de suministros de energía de corriente continua y en aplicaciones de accionamientos motrices. Se tienen 5 tipos de convertidores DC no aislados: Reductor (*buck*), elevador (*boost*), reductor-elevador (*Buck-boost*), Cúk, puente completo. El convertidor reductor *buck* produce una salida continua pura, para ello se basa en la topología de un filtro pasa bajo a la salida. El filtro paso bajo está formado por elementos capacitivos e inductivos (L-C). El esquema eléctrico del convertidor se puede observar en la Figura 1.

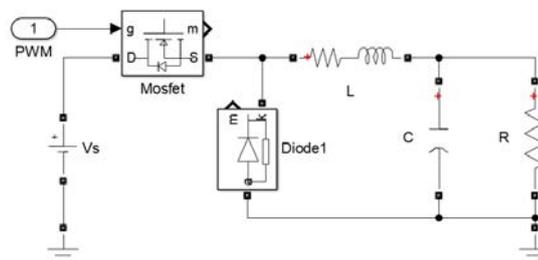


Figura 1. Convertidor reductor *buck*

2.1.1 Dimensionamiento del inductor y capacitor del convertidor DC-DC reductor

Para el análisis del convertidor se considerará que la corriente a través del inductor es positiva en todo intervalo de tiempo, es decir, el convertidor funciona en corriente permanente [10]. Para el funcionamiento régimen permanente se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La corriente en la bobina es permanente (ecuación (1)):

$$i_L(t + T) = i_L(t) \quad (1)$$

- La tensión DC en la bobina es cero (ecuación (2)).

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2)$$

La potencia entregada por la fuente es igual a la potencia de salida, esto es que la fuente sea ideal y que no existan pérdidas de potencia en la conmutación. Para el análisis del convertidor se tomará la suposición de que el circuito funciona en régimen permanente, el condensador C es muy grande, D es el ciclo de trabajo, T es el periodo y todos los componentes son ideales. Para el análisis de convertidor se toma en cuenta los diferentes estados que tiene el interruptor MOSFET durante su funcionamiento. Si se lo considera como un interruptor ideal, estos estados son equivalentes a trabajar con un interruptor cerrado y un interruptor abierto, los circuitos equivalentes en cada caso se observan en la Figura 2. Para el siguiente análisis se asumirá que el inductor es ideal, es decir $R_s = 0$.

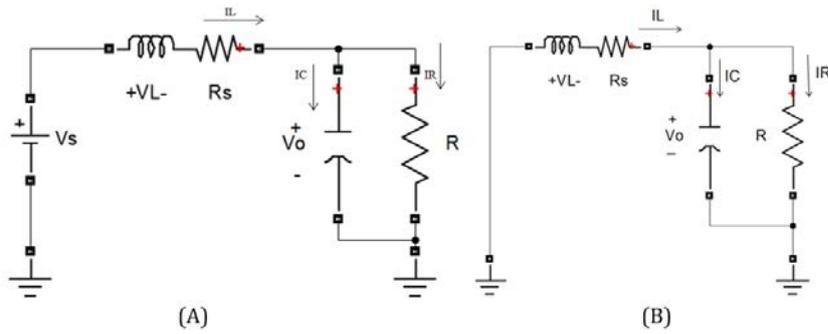


Figura 2. Circuito equivalente del convertido reductor con el interruptor: (A) cerrado y (B) abierto

Para el análisis del circuito con el interruptor cerrado el diodo se polariza en inversa. Se incrementa la corriente en el inductor, así como el voltaje en el capacitor. La corriente del inductor se puede expresar con la ecuación (3).

$$\Delta i_{L(Cerrado)} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (3)$$

En la ecuación (3), como V_s siempre será mayor que V_o la pendiente o la variación de la corriente en el inductor será positiva. Cuando el interruptor se abre, el diodo se polariza en directo, funcionando idealmente como un cortocircuito. Se tiene la corriente en el inductor con la ecuación (4).

$$\Delta i_{L(Abierto)} = -\frac{V_o}{L} (1 - D)T \quad (4)$$

De la ecuación (4) el signo negativo indica que la pendiente de la corriente en el inductor será negativa, es decir, la corriente decrece. En régimen permanente es necesario que la corriente en el inductor permanezca diferente de cero, lo que implica que la variación de corriente sea la misma al final y principio de cada ciclo [10], por lo que la variación total neta de corriente debe ser cero (ecuación (5)).

$$\Delta i_{L(Cerrado)} + \Delta i_{L(Abierto)} = 0 \quad (5)$$

De la ecuación (5) se obtiene la relación de la ecuación (6).

$$V_o = V_s D \quad (6)$$

La ecuación (6) indica que bajo condiciones ideales el voltaje de salida a través del resistor es igual al voltaje de entrada multiplicado por el factor el ciclo de trabajo D . Al resistor también se lo conoce como carga. Como el ciclo de trabajo tiene valores comprendidos entre cero y uno, el voltaje de salida siempre será menor que el de entrada. Los valores máximos y mínimos de la corriente en la bobina pueden ser calculados con base en su variación con cualquiera de las ecuaciones (4) o (5), que como se mencionó anteriormente deben ser iguales en régimen permanente. Para que el convertidor funcione en régimen permanente, la corriente en el inductor no puede ser negativa, por lo que se puede restringir el valor de corriente mínimo a cero, y así poder determinar un valor mínimo de inductancia (ecuación (7)).

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (7)$$

Para dimensionar el capacitor se debe tomar en cuenta la curva de corriente en el capacitor, como se observa en la Figura 3, cuya capacitancia se define con la ecuación (8).

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (8)$$

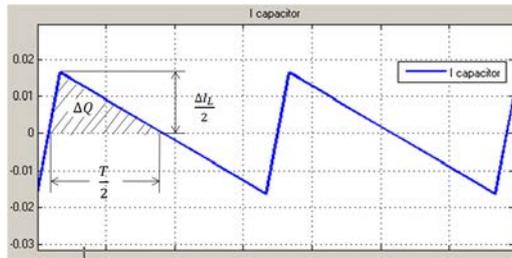


Figura 3. Corriente en el capacitor I_c transcurso del tiempo

ΔQ Se obtiene integrando el área bajo la curva de la corriente del capacitor en función del tiempo (Figura 3) (ecuación (9)).

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta I_L}{8C} \quad (9)$$

Reemplazando la ecuación (4) en (9) y el resultado en (8) se obtiene el valor de capacitancia mínima de la ecuación (10).

$$C_{min} = \frac{V_o(1-D)}{8L \Delta V_o f^2} \quad (10)$$

Para el presente trabajo de investigación se ha diseñado la fuente reductora que cumple con los criterios de conducción en régimen permanente [10]. El dimensionamiento de los materiales se los realizará según las siguientes condiciones: el voltaje de entrada es 12 V mientras que el voltaje de salida será de 6 V, la resistencia mínima de salida será de 5 Ω y tendrá un valor máximo de 10 Ω ; el rizado de salida debe ser inferior al 0.05% y la frecuencia de conmutación será aproximadamente de 30KHz. En función de los requerimientos mencionados, en la Tabla 1 se enumeran los elementos utilizados en la implementación práctica del convertidor reductor.

Tabla 1. Cuantificación cargas de consumo y potencia

Elemento	Valor Calculado	Valor Comercial Seleccionado
Capacitor (C)	1.7×10^{-3} F	2.2×10^{-3} F
Inductor (L)	8.33×10^{-5} H	1.12×10^{-3} H
Resistencia Inductor (R_s)	-----	180m Ω
N-Mosfet	-----	IRF540
Driver de N-Mosfet	-----	IR2110
Diodo Schottky	-----	MBR20100CT

2.1.2 Modelo matemático del convertidor DC-DC reductor

Para el análisis y modelamiento matemático del convertidor reductor es necesario dividir sus dos etapas de funcionamiento y obtener las ecuaciones íntegro diferenciales que describen la dinámica del convertidor. En la primera etapa se considera el circuito con el interruptor cerrado y en la segunda etapa el interruptor se encuentra abierto. Dadas las características inductor, considerado el circuito equivalente con el conmutador cerrado (Figura 2 (A)), se obtiene con las ecuaciones (11) y (12).

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} [V_s - V_o - I_L R_s] \quad (11)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{1}{C} [I_L - \frac{V_o}{R}] \quad (12)$$

Tomando la transformada de Laplace de las ecuaciones (11) y (12) y representando el sistema mediante diagrama de bloques se obtiene el sistema de la Figura 4.

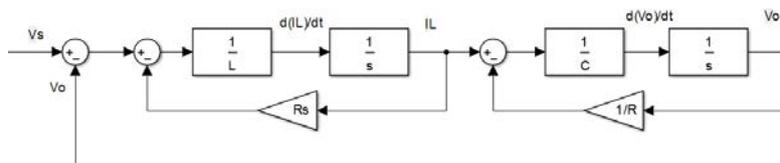


Figura 4. Dinámica del convertidor con el conmutador cerrado

Considerado el circuito equivalente con el conmutador abierto (Figura 2 (B)), se obtiene las ecuaciones (13) y (14).

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L} [V_o + I_L R_s] \quad (13)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{1}{C} [I_L - \frac{V_o}{R}] \quad (14)$$

Tomando la transformada de Laplace de las ecuaciones (13) y (14) y representando el sistema mediante diagrama de bloques, se obtiene el sistema de la Figura 5.

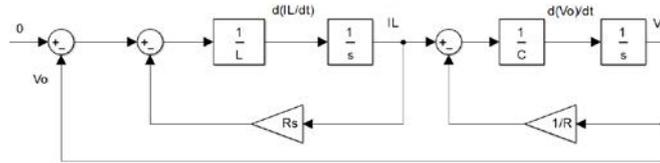


Figura 5. Dinámica del convertidor con el conmutador abierto

Como se puede apreciar en las Figuras 4 y 5 se mantiene la estructura general de convertidor, por lo que es posible utilizar el modelo promedio de pequeña señal [5], siempre y cuando la corriente en el inductor sea positiva. Para asegurar dicha corriente positiva, uno de los factores que influyen es el sobredimensionar el inductor tomando en cuenta el rizo de corriente producido por el inductor. Resolviendo el diagrama de bloques de la Figura 4 se obtiene el modelo promedio [11], donde D es el ciclo de trabajo y V_s es el voltaje de alimentación del convertidor (ecuación (15)).

$$V_0 = \frac{R}{RLCs^2 + (L + R_s RC)s + R_s + R} DV_s \quad (15)$$

Reemplazando los valores de cada elemento (Tabla 1) se obtiene una función de transferencia de segundo orden (ecuación (16)).

$$\frac{V_0}{DV_s} = \frac{4.058 \times 10^5}{s^2 + 251.6s + 4.205 \times 10^5} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (16)$$

La planta del convertidor tiene las siguientes características: $\omega_n = 648.46$ rad/s y $\xi = 0.19$; donde ω_n es la frecuencia angular natural y ξ el factor de amortiguamiento. La respuesta al escalón de la fuente conmutada comparada con la respuesta dinámica del modelo matemático se muestra en la Figura 6. El modelo matemático comparado con la respuesta de la fuente conmutada tiene un error del 1.4% en estado estacionario para el ciclo de trabajo seleccionado, lo cual se considera aceptable.

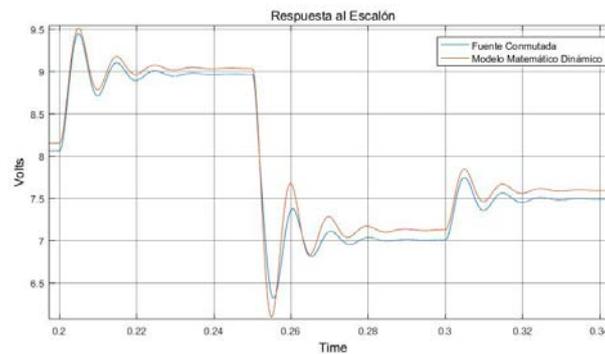


Figura 6. Respuesta al escalón

2.2 Diseño de los controladores MRAC y PID

2.2.1 Control Adaptativo por Modelo de Referencia MRAC

El controlador MRAC tiene como principal objetivo hacer que la salida de la planta se comporte de manera similar a un modelo de referencia. Para ello, hay que escoger la estructura del controlador que sea capaz de lograr dicho objetivo. En la Figura 7 se puede observar el esquema generalizado de un controlador por modelo de referencia.

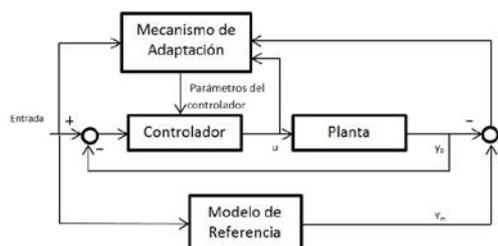


Figura 7. Esquema de un control Adaptativo por Modelo de Referencia

Para el ajuste de los parámetros del controlador escogido, se tienen diferentes métodos de adaptación, como la regla del gradiente decreciente y la teoría de estabilidad de Lyapunov [12]. El método del gradiente decreciente o regla del MIT fue desarrollado en el laboratorio de Instrumentación en el MIT. Esta regla es un algoritmo que ajusta los parámetros de los controladores en lazo cerrado, en función de la minimización de una función de costo. La función de costo usada se muestra en la ecuación (17).

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (17)$$

El error de esta función de costo es la diferencia entre la salida del modelo de referencia (y_m) y la salida actual del sistema (y_p) (ecuación (18)).

$$e = y_m - y_p \quad (18)$$

La regla del MIT además propone un método de actualización de los parámetros del controlador mediante el algoritmo del gradiente descendiente de la función de costo, a este método también se lo denomina como el método de sensibilidad, pues mide la variación de la función de costo frente a la variación de los parámetros θ (ecuación (19)).

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{2} e^2 \right) \quad (19)$$

La derivada parcial del error respecto a la variación de los parámetros se calcula con la ecuación (20).

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} (y_m - y_p) \quad (20)$$

Debido a que el modelo de referencia no depende de la variación de los parámetros del controlador se tiene la ecuación (21).

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} = -\frac{\partial y_p}{\partial \theta} (e) \quad (21)$$

Finalmente, la regla de adaptación se propone con la ecuación (22).

$$\frac{d\theta}{dt} = -\alpha \frac{\partial y_p}{\partial \theta} (e) \quad (22)$$

La constante α se denomina factor de aprendizaje. Este valor debe ser cuidadosamente seleccionado mediante simulación. Para valores altos de α , el tiempo de ajuste de parámetros se reduce, pero puede generar inestabilidad. Para valores bajos de α , tiempo de ajuste de parámetros aumenta, aunque aumenta la estabilidad. La regla del MIT asegura que el error se traslade en la dirección contraria a la del gradiente (Figura 8), llevando al error a un valor mínimo local. La desventaja del método es que el algoritmo no garantiza que se alcance el mínimo global y no asegura la estabilidad [12].

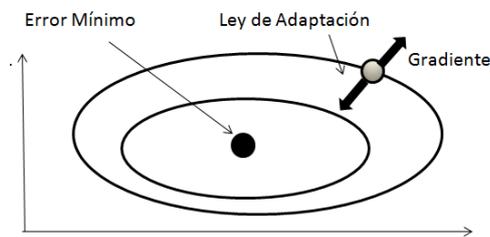


Figura 8. Principio del Método del Gradiente Decreciente

Para el diseño del controlador por modelo de referencia, es necesario definir un modelo a seguir, que será la métrica para ajustar los parámetros del controlador. La planta objeto de estudio es una función de segundo orden, por lo que el modelo a seguir tendrá también el mismo orden. Se ha decidido tomar un modelo de referencia con un factor de amortiguamiento $\xi = 0.7$, conservando la frecuencia angular natural $\omega_n = 648.46$, obteniendo la planta de referencia de la ecuación (23).

$$\frac{V_0}{DV_s} = \frac{4.205 \times 10^5}{s^2 + 907.84s + 4.205 \times 10^5} \quad (23)$$

Para el diseño del controlador, se utilizará la metodología descrita en [11] y [9], pero se ampliará el concepto para una planta de segundo orden. A continuación, se presenta la metodología utilizada para desarrollar el controlador. Expresando la ecuación (16) en ecuaciones diferenciales se tiene a ecuación (24).

$$\ddot{V}_o + 251.6\dot{V}_o + 4.205x10^5V_o = 4.058x10^5DV_s \quad (24)$$

Haciendo cambios de variables con la finalidad de facilitar los cálculos, se tiene el sistema de la ecuación (25).

$$\ddot{y} + a\dot{y} + by = cu \quad (25)$$

Dónde y es la salida del sistema (V_o), u es la entrada (DV_s), a , b y c son 251.6, $4.205x10^5$ y $4.058x10^5$ respectivamente, parámetros que de ahora en adelante se tomarán como desconocidos. Se tiene ahora el sistema deseado de segundo grado de la ecuación (26).

$$\ddot{y}_m + 2\xi\omega_n\dot{y}_m + \omega_n^2y_m = \omega_n^2w \quad (26)$$

Para que el sistema de la ecuación (25) tienda al sistema de la ecuación (26) es necesario diseñar un controlador que sea capaz de reproducir la dinámica deseada. Si se plantea la señal de control de la ecuación (27).

$$u = \theta_1\dot{y} + \theta_2y + \theta_3w \quad (27)$$

Reemplazando la señal de control (27) en (25) se tienen las ecuaciones (28) y (29).

$$\ddot{y} + a\dot{y} + by = c(\theta_1\dot{y} + \theta_2y + \theta_3w) \quad (28)$$

$$\ddot{y} + \dot{y}(a - c\theta_1) + y(b - c\theta_2) = c\theta_3w \quad (29)$$

Como se puede observar, ahora existen tres parámetros independientes θ_1 , θ_2 y θ_3 . Será el trabajo del controlador adaptativo ajustar los parámetros para que pueda reproducir la dinámica deseada. Tomando la transformada de Laplace del sistema se origina la ecuación (30).

$$y = \frac{c\theta_3}{s^2 + (a - c\theta_1)s + (b - c\theta_2)} w \quad (30)$$

Para estructurar la ecuación (22), es necesario encontrar $\frac{\partial y}{\partial \theta}$ para cada parámetro (ecuación (31)).

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_1} = \frac{c^2\theta_3s}{(s^2 + (a - c\theta_1)s + (b - c\theta_2))^2} w = s \frac{c\theta_3}{s^2 + (a - c\theta_1)s + (b - c\theta_2)} w \cdot \frac{c}{s^2 + (a - c\theta_1)s + (b - c\theta_2)} \quad (31)$$

Si se compara la ecuación (31) con la ecuación (30), se tiene la ecuación (32).

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_1} = sy \cdot \frac{c}{s^2 + (a - c\theta_1)s + (b - c\theta_2)} \quad (32)$$

Finalmente, la ley de adaptación de θ_1 es como muestra la ecuación (33).

$$\dot{\theta}_1 = -\alpha_1 \frac{c}{s(s^2 + (a - c\theta_1)s + (b - c\theta_2))} (sy) \cdot e_{(s)} \quad (33)$$

Como se puede observar, para implementar la ecuación (33) se requiere del conocimiento de los parámetros a , b y c . Para ello es necesario hacer las siguientes aproximaciones [12], tomando en cuenta que el sistema conforme pase el tiempo reproducirá la planta deseada (ecuación (34)).

$$\frac{c}{s^2 + (a - c\theta_1)s + (b - c\theta_2)} \approx \frac{4.205x10^5}{s^2 + 907.84s + 4.205x10^5} \quad (34)$$

Haciendo el cambio propuesto, se concluye que θ_1 evoluciona con la ecuación (35).

$$\dot{\theta}_1 = -\alpha_1 \frac{4.205x10^5}{s(s^2 + 907.84s + 4.205x10^5)} (sy)e_{(s)} \quad (35)$$

La ecuación (35) se denomina también función de sensibilidad. Haciendo lo propio para θ_2 y θ_3 se obtiene las ecuaciones (36) y (37).

$$\dot{\theta}_2 = -\alpha_2 \frac{4.205x10^5}{s(s^2 + 907.84s + 4.205x10^5)} ye_{(s)} \quad (36)$$

$$\dot{\theta}_3 = -\alpha_3 \frac{4.205x10^5}{s(s^2 + 907.84s + 4.205x10^5)} we_{(s)} \quad (37)$$

Para determinar los valores más apropiados para los factores de aprendizaje α_i es necesario un procedimiento de prueba y error mediante simulación, pues no existe una regla que determine el valor adecuado.

Debido a que el controlador será implementado en un microcontrolador, es necesario discretizar la ley de adaptación de cada uno de los parámetros θ_i . Como primer requisito se debe escoger la frecuencia de muestreo más adecuada. Existen varios criterios para seleccionar el tiempo de muestreo, pero en este trabajo se tomará el criterio descrito en [13], donde se enuncia que la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo 10 veces el ancho de banda de la planta. La frecuencia de corte ω_c a -3 dB para el sistema propuesto es $\omega_c = 971$ rad/s, por lo que se escoge la frecuencia de muestreo $T_s = 647.1 \mu\text{s}$. El método escogido para la discretización es el método del retenedor de orden cero. La función de sensibilidad discretizada se muestra en las ecuaciones (38), (39) y (40).

$$\theta_1(z) = -\alpha_1 \frac{T_s}{z-1} \cdot \frac{0.07204z+0.05919}{z^2-1.425z+0.5557} \cdot \left(\frac{z-1}{T_s} y(z)\right) \cdot e(z) \quad (38)$$

$$\theta_2(z) = -\alpha_2 \frac{T_s}{z-1} \cdot \frac{0.07204z+0.05919}{z^2-1.425z+0.5557} \cdot y(z) \cdot e(z) \quad (39)$$

$$\theta_3(z) = -\alpha_3 \frac{T_s}{z-1} \cdot \frac{0.07204z+0.05919}{z^2-1.425z+0.5557} \cdot w(z) \cdot e(z) \quad (40)$$

En la Figura 9 se puede ver el ajuste y evolución de los parámetros θ_1 , θ_2 y θ_3 en el transcurso del tiempo. Para una rápida conversión de los parámetros mencionados es recomendable inicializar los mismos con los valores obtenidos al comparar la ecuación (23) con (30). Mediante simulación se determinó los valores de los factores de aprendizaje son $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 5$ y $\alpha_3 = 4.5$, dichos valores cumplían de mejor forma con el compromiso de estabilidad-velocidad de adaptación.

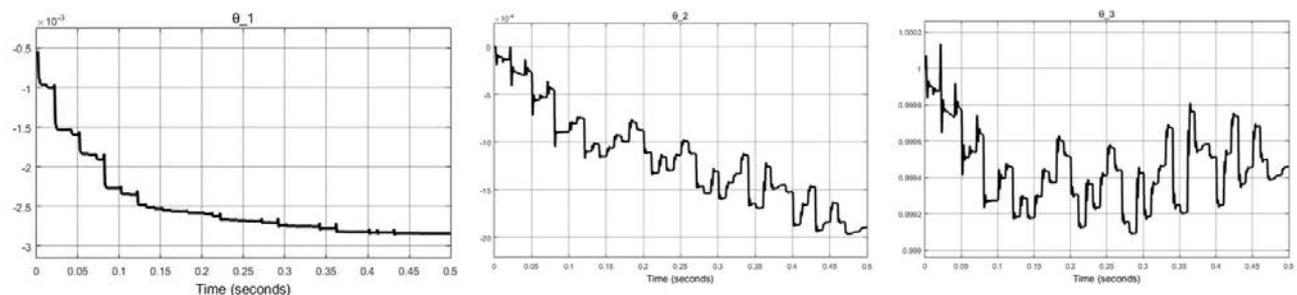


Figura 9. Evolución de los parámetros del controlador θ_1 , θ_2 y θ_3 en el transcurso del tiempo

La respuesta del sistema con el controlador MRAC se observa en la Figura 10, se presentan dos intervalos de tiempo. En el intervalo de tiempo inicial la respuesta del sistema controlado tiene una buena aproximación del comportamiento deseado de la planta, sin embargo, conforme pasa el tiempo y se ajustan los parámetros, la respuesta mejora, como se puede observar en el segundo intervalo de tiempo.

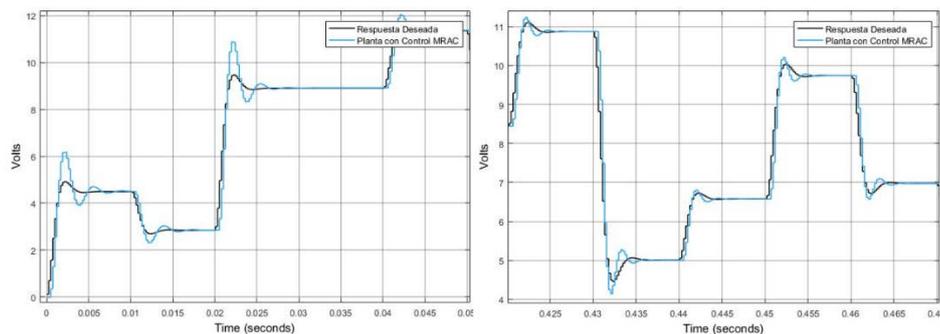


Figura 10. Respuesta al cambio del punto de trabajo en diferentes intervalos de tiempo

2.2.2 Control PID

El controlador PID, conocido también como controlador de tres términos [14], obedece a la ecuación (41).

$$salida = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (41)$$

La función de transferencia del controlador se calcula con la ecuación (42).

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (42)$$

A pesar de la simplicidad del controlador PID, en la industria un 90% de controladores son PID [15], y de este porcentaje, la gran mayoría de controladores en realidad son PI. Debido a su popularidad, el controlador PID cuenta con una gran cantidad de métodos para sintonizar los parámetros K_p , K_i , K_d [15]. En este trabajo de investigación se planteó utilizar el método de cancelación de polos y ceros, que es un método de diseño de controladores basado en el lugar geométrico de las raíces, que tiene por principal objetivo eliminar los polos que producen una dinámica indeseada en la planta [16] y reemplazarlos por polos que reproduzcan la dinámica deseada. Este método es posible implementar siempre y cuando la planta sea estable y de fase mínima [17]. La cancelación de polos modifica el grado de la planta, normalmente disminuyéndolo. Si un polo no se cancela exactamente, produce una respuesta con amplitud pequeña, pero con transitorios de larga duración. Si la cancelación no es exacta pero razonable, el resultado variará muy poco respecto del comportamiento deseado [16]. Si se propone un controlador PID como en la ecuación (43), en serie con la planta de la ecuación (16), se obtiene una planta de primer orden en lazo cerrado (ecuación (44)).

$$PID = \frac{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{k\omega_n^2\tau s} \quad (43)$$

$$G_{LC}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (44)$$

El tiempo de establecimiento se ha considerado el mismo que para el controlador adaptativo, por lo que τ toma un valor de $\tau = 1.76$ ms. Reestructurando el controlador PID propuesto (ecuación (43)), se pueden obtener los valores que toman las constantes kp , kd y ki (ecuaciones (45) a (48)).

$$PID = \frac{1}{k\omega_n^2\tau} s + \frac{2\xi}{k\omega_n\tau} + \frac{1}{k\tau} \cdot \frac{1}{s} \quad (45)$$

$$kp = \frac{2\xi}{k\omega_n\tau} \quad (46)$$

$$ki = \frac{1}{k\tau} \quad (47)$$

$$kd = \frac{1}{k\omega_n^2\tau} \quad (48)$$

Usando la información de la planta obtenida (ecuación (16)), se obtiene los valores numéricos de los parámetros del controlador PID (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros del controlador PID

Parámetro	Valor Calculado
kp	0.345
kd	1.4×10^{-3}
ki	588.789

Mediante simulaciones se determinó que el mejor método para discretizar el controlador PID, en función del desempeño del mismo, se alcanzó utilizando las aproximaciones de Euler en adelante en el término derivativo y Euler en atraso en el término integral. Con el tiempo de muestreo $T_s = 647.1 \mu s$, se tiene el controlador con la ecuación (49).

$$PID(z) = kp + ki \cdot T_s \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} + kd \cdot \frac{1-z^{-1}}{T_s} \quad (49)$$

En la Figura 11 se observa la respuesta al escalón de la planta en lazo abierto, comparada con la respuesta al escalón de la planta con el controlador PID.

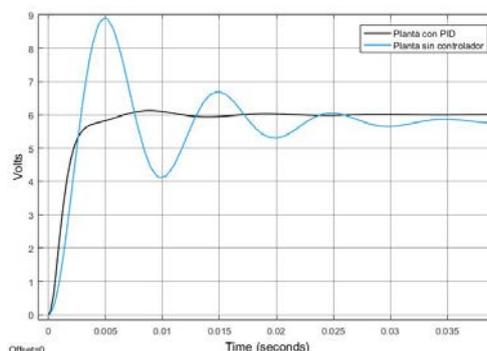


Figura 11. Respuesta al escalón de la planta con control PID

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La codificación de los controladores se realizó en un microcontrolador especializado en el procesamiento digital de señales dsPIC30F4011, funcionando a 30 MIPS. Para el muestreo de las señales se ha utilizado el osciloscopio basado en computador DS-1202, de la marca Acute. El nivel del punto de trabajo escogido fue de 6 V. La respuesta de la planta al escalón con los controladores MRAC y PID se observa en la Figura 12.

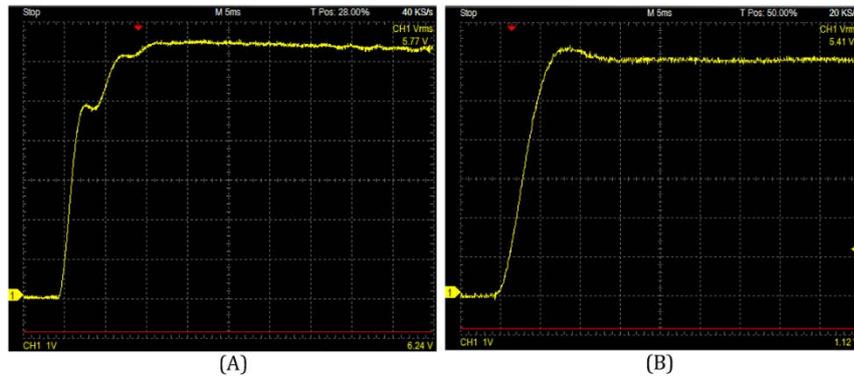


Figura 12. Respuesta al escalón de la planta con control: A) MRAC, y B) PID

Cabe mencionar que la respuesta de la planta con el controlador PID no fue satisfactoria desde un inicio, por lo que necesitó de un ajuste fino de sus constantes, quedando con los siguientes valores: $k_p = 1.15$, $k_d = 1.4 \times 10^{-3}$ y $k_i = 255$. Una vez realizado el ajuste fino, la respuesta de la planta frente al escalón se observa en la Figura 12 (B). De la gráfica se puede obtener los valores reales del tiempo de subida t_r , tiempo de establecimiento t_s y sobreimpulso M_p para cada controlador, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de respuesta al escalón del controlador PID y MRAC

Parámetro	Controlador PID	Controlador MRAC
t_r	6.36 ms	6.25 ms
t_s	9.17 ms	-----
M_p	6.9%	8.33%

Es importante destacar que la respuesta al escalón de la planta con el controlador MRAC presenta un alto tiempo de establecimiento desde un inicio, esto debido a que los parámetros del controlador se actualizan en cada ciclo de operación del microcontrolador, que con el transcurso del tiempo comienza a reproducir la dinámica de la planta de referencia. En la Figura 13 se puede ver la respuesta de la planta una vez que los parámetros del controlador se han ajustado y el error entre la planta de referencia y la salida de la planta se ha minimizado. La planta presenta las características de respuesta en el tiempo frente a una entrada escalón: $t_r = 2.5$ ms, $t_s = 8.13$ ms y $M_p = 20\%$.

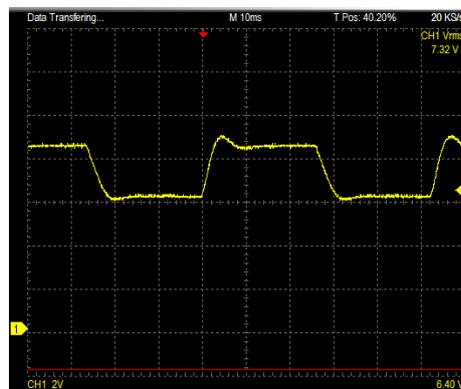


Figura 13. Respuesta al escalón de la planta con control MRAC con mejor ajuste de parámetros

A continuación, se evaluará el comportamiento de cada controlador frente al cambio de la resistencia de carga del convertidor. El efecto del cambio o conmutación de la carga resulta en la variación de los niveles de voltaje de salida [18]. Si la resistencia de carga disminuye, el voltaje de salida se ve disminuido, por otro lado, si la resistencia de carga aumenta, también lo hace el voltaje. El experimento para comparar el desempeño de los controladores fue diseñado como sigue: el punto de trabajo se mantiene fijo en 6 V, la resistencia de carga inicial es de 5 Ω , se conmuta un resistencia en serie de 5 Ω cada 100 ms, dando una resistencia de carga máxima de 10 Ω y mínima de 5 Ω . En la Figura 14(A) se observa la respuesta de la planta sin controlador y en la Figura 14(B) y Figura 14(C) se observa la respuesta de la planta con los controladores MRAC y PID respectivamente.

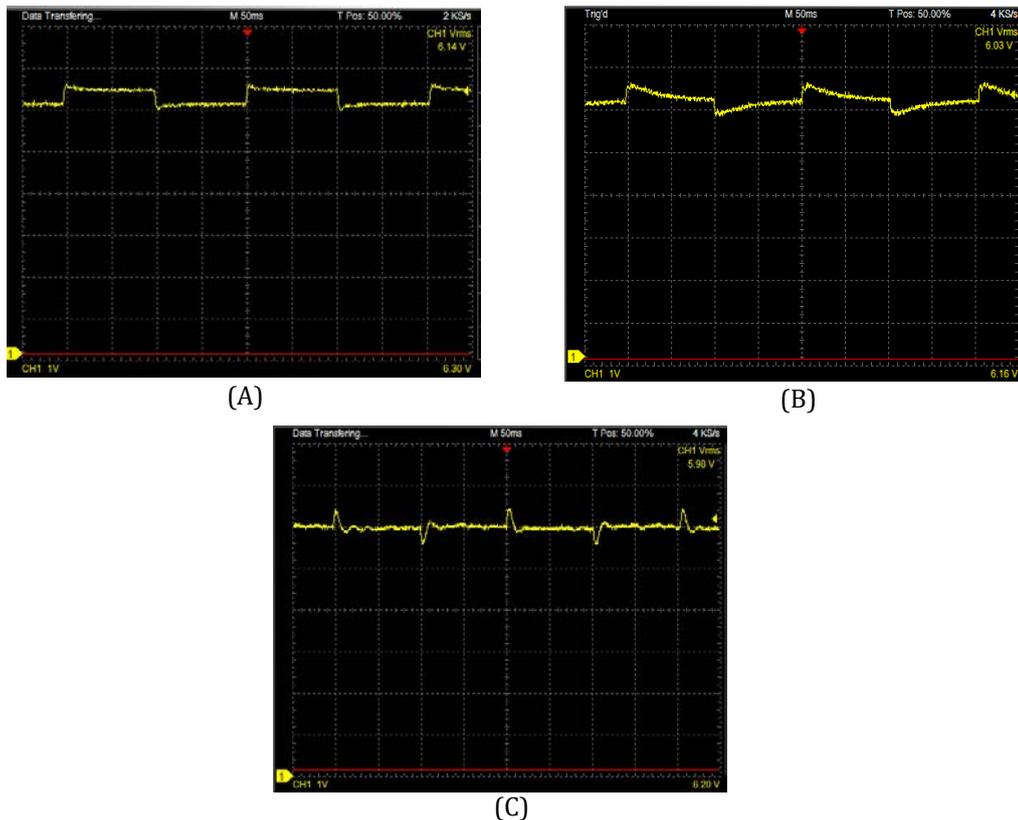


Figura 14. Respuesta de la planta frente a cambios de la resistencia de carga: A) sin controlador, B) con controlador MRAC, y C) con controlador PID

Como se observa en la Figura 14, los dos controladores realizan bien su función, mantienen el voltaje de salida estable, sin embargo, el controlador PID reacciona con mayor rapidez frente a la perturbación.

4. CONCLUSIONES

El controlador adaptativo por modelo de referencia demostró un buen desempeño frente al seguimiento, pero no demuestra ser mejor que un control PID frente al rechazo de perturbaciones. Al ser un algoritmo recursivo necesita mayor tiempo para adaptar sus parámetros a nuevos cambios. El control PID resultó ser mejor frente a perturbaciones cuando el punto de consigna permanece constante, la desventaja que presenta es que necesitó de un ajuste fino de sus parámetros. Resulta un punto desfavorable frente al controlador adaptativo, que no necesita de un ajuste manual por la misma naturaleza del controlador.

El mayor potencial del controlador adaptativo por modelo de referencia se obtiene cuando a más de haber variación de los parámetros hay cambios del punto de consigna. El rendimiento del controlador adaptativo depende directamente de los valores escogidos para los factores de aprendizaje. Valores bajos de los mismos aumentan el tiempo de convergencia de los parámetros del controlador, hecho que no es deseable. Por otro lado, valores relativamente altos pueden llevar a la inestabilidad de la planta. Dichos valores deben ser definidos mediante prueba y error en la herramienta de simulación. Para ello es necesario observar las curvas de evolución de los parámetros del controlador adaptativo en el tiempo.

El microcontrolador escogido para la aplicación demostró ser el adecuado a pesar del reducido tiempo de muestreo de la planta $T_s = 647.1\mu\text{sec}$. Se codificaron los controladores en un microcontrolador especializado en el procesamiento digital de señales dsPIC30F4011.

Debido a que el trabajo de investigación se delimitó a evaluar los controladores al cambio de carga de salida manteniendo el punto de consigna y a la respuesta al escalón, se propone como un trabajo futuro evaluar el rendimiento de los controladores cuando a más del cambio de carga existen cambios en el punto de consigna.

REFERENCIAS

- [1] Ayala, P. (2015). Diseño convertidor buck-boost DC-DC invertido con identificación adaptativa y control por localización de polos. Recuperado: <http://studyres.es/doc/1164984/dise%C3%B1o-convertidor-buck-boost-dc-dc>.
- [2] Poodeh, M. et al. (2007). Optimizing LQR and pole placement to control buck converter by genetic algorithm. En International Conference on Control, Automation and Systems. San Diego, USA.

- [3] Borrel, A. (2012). Controlador de histéresis de bajo coste para convertidor buck síncrono multifase. Disertación doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [4] Mahla, I. et al. (2015). Análisis del modelo híbrido del convertido buck en lazo abierto. En XI Congreso Latinoamericano de Control Automático y X Convención Internacional y Feria Informática. Lima, Perú.
- [5] Oliva, A., Ang, S. y Bortolotto, E. (2006). Digital control of a voltage-mode synchronous buck converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(1), 157-163.
- [6] Ayala, J. et al. (2015). Diseño e implementación de un control dual por modos deslizantes para un convertidor buck CD-CA. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(1), 91-111.
- [7] Marulanda, J., Ordoñez, J. y Mosquera, L. (2017). Diseño y construcción de un convertidor dc/dc tipo Boost con PWM ajustable. *Scientia Et Technica*, 22(1), 9-14.
- [8] Gallardo, R., Placencia, S. y González, L. (2016). Diseño de un cargador de baterías en aplicaciones de energía solar. *Mascana*, 5, 89-98.
- [9] Molina, I. et al. (2014). Diseño y construcción de un sistema portátil de generación eléctrica para cargar un banco de baterías. *Revista Politécnica*, 34, 1-10.
- [10] Hart, D. (2001). *Electrónica de potencia*. Pearson.
- [11] Mude, N. y Sahu P. (2012). Adaptive control schemes for DC-DC buck converter. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(3), 463-467.
- [12] Astrom, K. y Wittenmark, B. (2008). *Adaptive Control*. Prentice Hall.
- [13] Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto*. Prentice Hall.
- [14] Bolton, W. (2001). *Ingeniería de Control*. Alfaomega.
- [15] Astrom, K. y Häggglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. Pearson.
- [16] Villacrez, E. (2001). Estudio e implementación de un método de ajuste de controladores PID-Difusos aplicado en el control de nivel del líquido. Recuperado: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9843>.
- [17] Ogata, K. (2013). *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson.
- [18] Khan, T. y Mahanta, C. (2016). An intelligent adaptive control of DC-DC buck converters. *Journal of the Franklin Institute*, 353(12), 2588-2613.

Diseño y construcción de un prototipo de digestor para la producción de biogás metano como recurso energético

Pedro Luis Muñoz Ochoa
Alixdey Andrea Gutiérrez Cárdenas
Diana Del Pilar Atehortúa Amaya
Corporación Universitaria del Meta
Colombia

Los residuos orgánicos de origen animal y vegetal se constituyen en un residuo contaminante e indeseado que requiere de un manejo adecuado para el aprovechamiento de esta biomasa, la cual es necesario clasificar y caracterizar para su uso sostenible energético, evitando o reduciendo la generación de gases efecto invernadero que afectan el clima y medio ambiente contribuyendo al calentamiento global. Se realiza en este proyecto de investigación el diseño de diferentes prototipos de digestores para el aprovechamiento de las excretas de ganado y materiales orgánicos vegetales en la producción de biogás (metano) con fines energéticos contribuyendo a la aplicación y generación de energías alternativas en la vereda la llanerita, Apiay, Villavicencio, Meta.

1. INTRODUCCIÓN

La biomasa es una de las formas de energías más abundante, que requieren de una clasificación y caracterización para su manejo por medio de las tres rutas. Como se observa en la Figura 1. La ruta física toma el material orgánico de origen vegetal que por lo general se presenta en estado sólido y realiza con ellos operaciones como corte, aserrado, astillado, tamizado, prensado, des humidificación y secado que tienen como fin la producción de briquetas y pellets para su uso en calderas o sistemas de calefacción y producción de calor. La ruta termoquímica emplea la combustión, la pirolisis, la gasificación para obtener bio carbón, aceites, biocombustibles o gas. La tercera ruta que es bioquímica utiliza procesos de fermentación o digestión aeróbica y anaeróbica en las que se emplean operaciones como el compostaje, así como digestores con el objetivo de transformar esta biomasa en bio abono y biogás. La bioenergía requiere el uso de tecnología moderna y una aplicación adecuada para evitar la contaminación ambiental y daños a la salud [7].

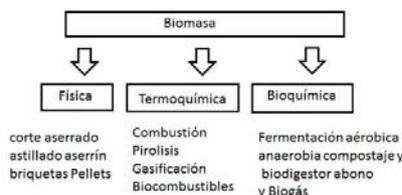


Figura 1. Rutas de la biomasa [7]

En entornos rurales alejados de los centros urbanos donde las habitantes no cuentan con servicios como la energía eléctrica, las personas utilizan la combustión o quema de madera para la cocción de alimentos, también se dedican a actividades agrícolas de cultivos y ganadería, que son una fuente de producción de biomasa y de residuos de origen vegetal o animal que requieren de un manejo adecuado para que este material no sea contaminante o afecte al medio ambiente.

En operaciones de ganadería se requiere de un proceso adecuado del manejo de las excretas, aguas residuales o excrementos de los animales para que este material no termine contaminando las fuentes de agua. Por ello la universidad desde la escuela de ingeniería apoya proyectos de investigación en esta línea, con la compra de un equipo de laboratorio, específicamente el digestor anaeróbico marca Armfield con control de temperatura modelo W8 y un proyecto de investigación de diseño y construcción de un prototipo de digestor para la producción de biogás metano como recurso energético en el parque metropolitano maría lucía PMML.

Con la compra del digestor de laboratorio W8 Armfield y la capacitación por parte del proveedor, es posible realizar análisis de diferentes sustratos y realizar prácticas de laboratorio con estudiantes, lo cual hace parte de otro proyecto de investigación del que se habla posteriormente en otro artículo como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Biodigestor modelo W8 marca Armfield, laboratorio de hidráulica corporación Universitaria del Meta

En el parque Metropolitano María Lucía PMML se desarrolla el proyecto de investigación *Diseño y construcción de un prototipo de bio digestor para la producción de biogás metano como recurso energético*. Que tiene como objetivo principal *construir unos prototipos de Bio digestor probando diferentes compuestos orgánicos para el parque Metropolitano María Lucía*.

Para el diseño y construcción de digestores, es necesario definir que es un digestor, que tipos de digestores existen y cuál es el más adecuado de acuerdo con las características del sustrato o biomasa disponible y de los recursos materiales o económicos con que se cuenta. Se puede definir el digestor como un contenedor hermético en el que se aloja o deposita el material orgánico de origen animal o vegetal, en el cual mediante un proceso de degradación o fermentación que puede ser aeróbica o anaeróbica este material se transforma en biogás [1] y biobol como se ve en la Figura 3. El bio digestor tubular es una manga hermética cerrada de forma cilíndrica, fabricada en material de geo membrana de PVC con alta protección a la acción de los rayos ultra violeta, impermeable al agua y baja permeabilidad a los gases. Es fabricado mediante sellado electrónico de alta frecuencia [10].

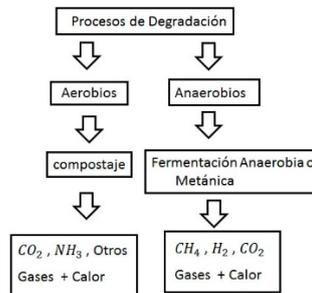


Figura 3. Vías de degradación de la biomasa [1]

Los digestores se pueden clasificar de múltiples formas de acuerdo a la tecnología empleada, de acuerdo al proceso desarrollado, de los materiales utilizados como se puede observar en la Figura 4 según el proceso se pueden clasificar en discontinuos, semi continuo, continuos. En función de la tecnología empleada primera, segunda o tercera generación, en función de la forma de almacenamiento del gas de campana fija, móvil o flotante, de gasómetro de caucho. Dependiendo de la geometría cilíndrica tipo salchicha, oval esférico, cuadrado. Según los materiales bio digestores de hormigón, acero, ladrillo, vidrio, acrílico, plástico, geo membrana y también rurales, industriales, etc.

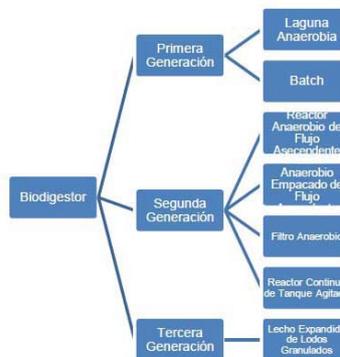


Figura 4. Clasificación biodigestores según Proceso, Tecnología [3]



Figura 5. clasificación Biodigestores rurales [3]

La institución cuenta con un terreno de aproximadamente 120 hectáreas, conocido como Parque Metropolitano María Lucía PMML, ubicado en la vereda la llanerita Apiay, a una distancia de 14 a 15 kilómetros de casco urbano de Villavicencio Meta, en este sitio la institución desarrolla diferentes proyectos de investigación de la escuela de ingenierías y de diversas asignaturas como la asignatura de energías renovables, en este sitio y cerca al corral de

ganado se dispone del lugar donde se ubican los prototipos desarrollados en esta investigación. Para el diseño de los diferentes prototipos de digestores se realiza una visita al jardín botánico José celestino mutis en Bogotá y a la granja agroindustrial la Cosmopolitana. Restrepo meta con el fin de conocer los sistemas implementados y existentes en diferentes lugares para tomar mejores decisiones en cuanto al diseño y construcción del digestor como lo muestra la Figura 6.



Figura 6. Visita para ver los modelos de Biodigestores Jardin Botánico Jose celestino Mutis Bogotá

2. MÉTODO

La metodología empleada es primero con la capacitación de parte de proveedor del digestor de laboratorio Armfiel W8 y visitas realizadas a diferentes lugares como el jardín botánico José celestino mutis, granja agroecológica la Cosmopolitana y consulta bibliográfica permiten orientar el diseño de los prototipos implementados en el parque metropolitano María lucia. Los tipos de digestores y su tamaño dependen del objetivo principal del proceso, que puede ser la máxima obtención de gas, la disminución de la carga contaminante de los efluentes a tratar, la obtención de compost [9]. En la primera fase se toma la determinación de un prototipo de digestor que fuera económico, fácil de transportar e implementar en zonas rurales teniendo en cuenta consideraciones de tipo climático y tipo de sustrato a emplear las cuales se representan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipo de Bio digestor y selección, modelo de Geo membrana (Geo soluciones) medidas y características

Tipos	Materiales	Precio y portabilidad
Tipo Chino	Concreto y Cemento tanque entrada y salida	Elevado , no portable
Tipo Hindú	Concreto Cemento Campana Metálica tanque entrada y salida	Elevado, no portable
Tipo Cilíndrico Salchicha	Bolsa plástica o Geo membrana tuberías entrada salida	Medio y portable
Geo Membrana Modelo STD 750	10 metros cúbicos	1,22 diámetro, 8,6 longitud (metros)
	20 metros cúbicos	1,45 diámetro, 11,9 longitud (metros)
	30 metros cúbicos	1,76 diámetro, 12,3 longitud (metros)
	40 metros cúbicos	1,94 diámetro, 13,6 longitud (metros)
	60 metros cúbicos	2,22 diámetro, 15,5 longitud (metros)

El digestor seleccionado es el tipo semi continuo, con forma geométrica cilíndrica y de material PVC tubular taiwanés salchicha o bio bolsa, esta geo membrana es adquirida a la empresa geo soluciones. El estiércol son las heces fecales de los animales y en general contienen del 8 al 25% de sólidos. Este puede ser mezclado con agua para ser alimentado al digestor en diferentes relaciones 3 a 1 o 10 a 1 [7]. Paralelamente mientras llega la geo membrana se desarrollaron prototipos de digestores con caneca y bidones plásticos con capacidades de 60 litros y tubería de una pulgada, estos digestores se alimentan con materia orgánica animal , concretamente con el excremento de res que se recoge en el corral del ganado diariamente o cada 3 días y se almacena en canecas, en estos primeros diseños se observaron algunos problemas como el hecho de que es frecuente que las tuberías del digestor se taponan con el mismo material cuando se solidifica o no se diluyen lo suficientemente con agua, así como su alimentación constante, también presentaron inconvenientes con la hermeticidad de los tanque que en algunos momentos presentan fugas del material y de gas teniendo como experiencia un baja producción de metano (Figura 7).



Figura 7. Prototipos de biodigestores con Bidones plasticos parque Metropolitano María Lucía

Con la compra y llegada al parque metropolitano de la geo membrana, se procede con los estudiantes de ingeniería eléctrica y ambiental a realizar el cercado del terreno donde se ubica el digestor que es en la parte posterior del corral, esta geo membrana modelo STD 750 de Geo soluciones tiene una forma cilíndrica con capacidad total de 10 metros cúbicos, con dimensiones de 8,6 metros de largo y diámetro de 1,22 metros, con las dimensiones se procede con los estudiantes de ingeniería electrónica y eléctrica a realizar la excavación de tierra como observamos en la Figura 8.



Figura 8. Aducción cercado y excavación para Geomembrana para biodigestor parque Metropolitano María Lucia

Este cilindro tiene en la parte lateral superior e inferior dos agujeros de aproximadamente cuatro pulgadas para ubicar allí las tuberías para la entrada y salida de material orgánico, en la parte superior tiene otro orificio con un tubo con rosca de una pulgada para la salida del gas metano, la excavación que tiene una forma trapezoidal para evitar que las paredes laterales longitudinales, que alojan el digestor se desbarranque, evitando que la forma cilíndrica del mismo se deforme en el momento de carga o alimentación del sistema (Figura 9).

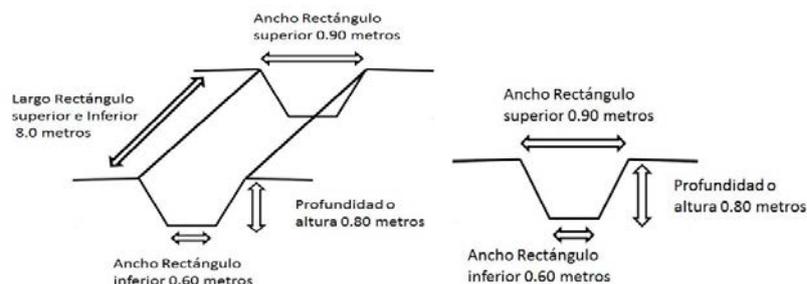


Figura 9. Dimensiones en metros del Agujero para Geomembrana del biodigestor parque Metropolitano María Lucia

Se tomó la geo membrana y se extiende en el terreno para trazar el rectángulo de la parte superior del trapezoide 8.0 metros de largo por 0.90 metros de ancho 0.80 de profundidad, el rectángulo de la parte inferior de 8.0 metros de largo por 0.60 de ancho (Figura 10).



Figura 10. Canecas con material orgánico para llenado del digestor Friogan Villavicencio. Geomembrana para digestor parque Metropolitano María Lucia, disposición tubería entrada y salida de material organico en la geo membrana

Una vez finalizado el proceso de excavación se procede a recoger las heces o material orgánico, en ese periodo de tiempo se encuentra en temporada de verano y se recoge poco excremento por lo que se toma la decisión como se en la figura 10 de ir al frigorífico Friogan con el camión y llenar varias canecas con material fresco para el proceso de carga del digestor. En total se utiliza 6 canecas con material orgánico , y el día anterior se recogió varias canecas con agua, realizando una práctica de laboratorio con los estudiantes de ingeniería ambiental en un fin de semana para realizar la mezcla del material en una proporción de 3 : 1; 3 partes de agua por una de 1 de excremento , el material se pesó y se preparó en bidones o canecas de 60 litros y mediante baldes se procede a llevar el sustrato (agua + excremento) a la tubería de entrada al digestor, esta tubería es de cuatro pulgadas conectándose al digestor mediante abrazaderas metálicas y ubicando 2 llaves de paso tipo bola, una a la entrada y otra a la salida para introducir y extraer el material cuando sea necesario. Para el proceso de llenado del digestor se cierra la válvula o llave de salida y se abre la llave de paso de entrada, en la tubería de entrada se coloca una derivación en Ye y 2 codos para realizar el llenado más rápidamente mediante baldes como se observa en la Figura 11 antes de ingresar el material al sistema se realiza

la medición del PH si el nivel de PH es menor de 6 se puede agregar soda caustica para neutralizar si el PH es mayor a 8 se agrega vinagre para neutralizar , nivel de temperatura nivel de PH y tiempo en días datos (Tabla 2).



Figura 11 Preparacion , mezcla del material medicion de PH y Temperatura en el proceso de carga del biodigestor

Tabla 2. Temperatura, PH, tiempo en días. Bio digestor mediciones

Temperatura externa Grados C	Temperatura Interna Grados C	Nivel de PH	Tiempo en días Para medición
32.08	33.2	6	1 carga digestor
30.45	32,1	7	15
31.14	33.4	7	30
31.4	34.0	8	45
30.7	32.7	7	60

La Geo membrana del digestor tiene una capacidad de 10 metros cúbicos y se llena a un 70 % de su capacidad, es decir se llena 7 metros cúbicos de sustrato, realizando la diferencia de la capacidad total 10 metros cúbicos menos 7 metros cúbicos de sustrato da 30 % o 3 metros cúbicos libre para que se expanda la membrana en el proceso de fermentación anaerobia debido a bacterias mesofílicas para este rango de temperatura, que bajo condiciones de temperatura y PH tarda aproximadamente de 30 a 60 días como tiempo de retención TRS para la producción del gas metano (Tabla 3).

Tabla 3. Tiempo de retención y temperatura digestor

Región	Temperatura en (grados C)	Tiempo retención en días
Altiplano	10	90
Valle	20	70
Trópico	30	50

Se utiliza la relación 3 partes de agua por 1 de excremento, aunque se pueden utilizar otras se decide esta para que la mezcla no quede muy espesa como para producir atascos en el sistema, una vez finalizado el llenado del contenedor se procede a revisar que las llaves de paso se encuentren cerradas para garantizar el nivel de hermeticidad del digestor, en la parte superior del sistema se coloca una tubería de 1 pulgada para la salida del gas metano hacia el reservorio. En esta tubería y mediante una T se coloca una válvula de alivio la cual es la encargada de controlar el nivel de presión del sistema, así como una llave de paso hacia el reservorio o sitio donde se utiliza el gas metano. En la Tabla 4 analiza el rango de temperaturas y tipos de bacterias responsables del proceso de fermentación anaerobia.

Tabla 4. Tipo de bacterias y rangos de temperatura digestor. Manual de digestores y Biogás [4] UPME

Proceso de fermentación	Mínimo	Optimo	Máximo	Tiempo de fermentación o TRS
Psicrofílica	4 a 10 grados C	15 a 18 grados C	20 a 25 grados C	Sobre 100 días
Mesofílica	15 a 20 grados C	25 a 35 grados C	35 a 45 grados C	30 a 60 días
Termofílica	25 a 45 grados C	50 a 60 grados C	75 a 80 grados C	10 a 20 días

En la figura 12 se observa el sistema del digestor cargado. El biogás es mezcla de metano y dióxido de carbono producido por la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos. La parte activa (metano) puede utilizarse para cocinar, para la calefacción y alimentar moto generadores eléctricos [5].



Figura 12. Digestor cargado al 70% de su capacidad. Biodigestor 2 meses después, muestra la presencia de gas metano lo cual se visualiza en la expansión de la geomembrana

El biogás se puede producir por digestión, pirolisis o hidrogasificación. La digestión es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno y en presencia de organismos anaeróbicos a presiones ambientales y diferentes temperaturas [8]. La producción del biogás depende de tres aspectos importantes que son:

1. El tipo de sustrato o material orgánico empleado
2. Temperatura al interior del sistema
3. Nivel de PH del material

La descomposición o proceso de fermentación del sustrato se da en condiciones anaerobias (sin presencia de oxígeno al interior del sistema y pasa por 4 fases que son:

1. Hidrolisis
2. Acido génesis
3. Citogénesis
4. Metalogénesis

Aquí presentamos las diferentes ecuaciones empleadas en el proceso. La ecuación (1) permite calcular la producción aproximada de gas metano.

$$G_p = E_{kd} * P_{mo} * P \quad (1)$$

Donde:

GP = Gas producido en litros por día.

Ekd = Estiércol en kilogramos por día.

Pmo = Porcentaje de materia orgánica del estiércol según la especie.

P = Producción aproximada de m3 de gas/1Kg de masa orgánica seca total.

La ecuación (2) permite calcular el tiempo aproximado en días necesario para la producción del gas metano.

$$TR = (-51,227 * Ln(ToC) + 206,72) \quad (2)$$

Donde:

TR = Tiempo de retención en días.

Ln = Logaritmo natural.

ToC = Temperatura promedio en grados centígrados del sitio donde se instalará el digestor.

La ecuación (3) nos permite determinar de forma aproximada la cantidad de estiércol producida por día según las características del ganado que se tenga.

$$E = Na * PVP * \frac{PE}{100} \quad (3)$$

Donde:

E = Estiércol en kilogramos por día.

NA = Número de animales por especie (por ejemplo 100 vacas).

PVP = Peso vivo promedio por animal (por ejemplo 1250 lb vaca lechera = 567 Kg.).

PE = Producción de estiércol por animal en porcentaje de peso vivo. (Por ejemplo 5%).

E=100*567*0,05 = 2835 Kg/día.

Con la ecuación (4) se determina de forma aproximada la cantidad de orina producida por las reses disponibles.

$$O = Na * PVP * \frac{Po}{100} \quad (4)$$

Donde:

O = Orín día en Kilogramos (se asume que 1 litro de orín pesa 1 Kilogramo).

Na = 100 vacas.

PVP = 567 Kg

Po = Producción de orín por animal en porcentaje de peso vivo (se asume que 1 litro de orín pesa 1 Kilogramo.)

Po = 4%.

La ecuación (5) se utiliza para el cálculo aproximado de la cantidad de material necesario para la carga del digestor

$$C = MPC + MH2O \quad (5)$$

Donde:

C = Carga diaria para alimentar el digestor en Kilogramos por día o litros por día.

MCM = Materia prima para carga en Kilogramos por día.

MH2O = masa de agua para mezcla que disminuye hasta 10% los sólidos orgánicos

Contenidos en la materia prima, en Kilogramos por día.

La ecuación (6) permite determinar la cantidad aproximada de agua necesaria para la mezcla del material en el digestor.

$$MH2O = \frac{MPC * ST}{10} - MPC \quad (6)$$

Donde:

MH2O = Masa de agua para mezcla que disminuye hasta un 10% los sólidos orgánicos contenidos en la materia prima, en Kilogramos por día.

ST = Cantidad de sólidos orgánicos contenidos en la materia prima para la carga, en kilogramos por día.

MPC = Materia prima para carga en Kilogramos por día.

La ecuación (7) es utilizada para calcular la cantidad de materia prima o estiércol necesario para la carga del digestor.

$$MPC = E + O \quad (7)$$

Donde:

MPC = Materia prima para cargar en Kilogramos por día.

E = Estiércol en Kilogramos por día.

O = Orín en Kilogramos por día.

Con la ecuación (8) es posible determinar la cantidad de sólidos totales que deben ser diluidos con agua en el digestor.

$$\%ST = \frac{E * \%EST}{MPC} \quad (8)$$

Donde:

%ST = Porcentaje de sólidos totales contenidos en la materia prima para carga.

MPC = Materia prima para carga en kilogramos por día.

%EST = Porcentaje de sólidos en el estiércol.

%EST = 16%.

E = Estiércol en Kilogramos por día.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Uno de los objetivos específicos es tener un prototipo de un digestor funcional, práctico, para la producción de gas metano y el digestor tubular cumple bien dicha función de contener en forma hermética en su interior diferentes sustratos orgánicos, en nuestro caso estiércol de res porque es el material más abundante en la región por su tradición ganadera falta realizar experimentos adicionales con otros sustratos como son los residuos de comida y material vegetal procedente de plazas de mercado para realizar estudios comparativos de la cantidad y calidad del gas producido en función del sustrato empleado, lo que implica tener otro digestor adicional o esperar a descargar el digestor y cargarlo con otro material orgánico lo que lleva un tiempo adicional para este proceso.

Para esta primera fase en la que se emplea estiércol de res por razones anteriormente expuesta se logra como resultado primero la producción de gas metano con la ventaja adicional de reducción de la carga contaminante de efluentes procedentes de los corrales de ganado que casi siempre van a parar a fuentes de agua o ríos.

Un segundo resultado que se obtiene es el uso o aplicación que se hace del gas metano en esta primera fase se utiliza el gas metano con fines de producir energía calorífica para la cocción de alimentos reemplazando la tala y utilización de quema o combustión de madera que es una práctica común en la región.

Un tercer resultado es que con la producción de gas metano en el digestor se obtiene un producto adicional que es el biobol, que es abono orgánico natural el cual puede ser utilizado en reemplazo de abonos químicos utilizados en los cultivos y plantaciones.

Un cuarto resultado que por cuestiones de la pandemia no se ha podido realizar es la limpieza de gas para aplicarlo a una planta eléctrica dual de gasolina y gas, que consideramos desarrollar en una segunda fase como un proyecto adicional.

Para esta segunda fase del proyecto se tiene la compra de una planta eléctrica dual que funciona a gasolina y gas propano de 3 KW marca Westinghouse para estudiar el uso del gas metano en aplicaciones de generación de energía eléctrica.

4. CONCLUSIONES

Como conclusiones tenemos que la tecnología y aplicación de los Digestores son una solución a la producción de energía calorífica y eléctrica en entornos rurales, lo que contribuye a la disminución de los gases efecto invernadero.

Los digestores son una tecnología adecuada para el control y eliminación de la contaminación ambiental de aguas, cambio climático y favorecen la producción de abono orgánico con beneficios económicos. Adicionalmente contribuyen a la diversificación energética y autogeneración en zonas que no cuentan con servicio de energía eléctrica.

Que dependiendo de la cantidad de material orgánico de sustrato disponible se pueden emplear diferentes proporciones o relaciones 3: 1, 4: 1, o 10: 1. En el caso de Digestores con ductos o tuberías de ½ pulgada se recomienda relaciones de 6: 1, o 10: 1, para evitar taponamientos a la entrada o salida del digestor.

Para sustratos de origen vegetal y restos de comida de sugiere realizar operaciones de adicionales de selección y molido de material para que este se pueda diluir y fermentar más fácilmente evitando tener problemas en el ingreso y salida del material al digestor.

En climas fríos es recomendable utilización de sistemas de calentamiento cubiertas térmicas que permitan controlar la temperatura y acelerar el proceso de TRS o tiempo de producción de gas metano.

REFERENCIAS

- [1] Borja, M. (2018). Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. Reverte.
- [2] San Miguel, G. (2015). Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Mundi.
- [3] Salamanca, J. (2009). Diseño, construcción y puesta en Marcha de Biodigestores. Tesis de grado. USFQ, Quito.
- [4] UPME. (2003). Manual de Diseño de Biodigestores. UPME.
- [5] Bridgewater, A. (2009). Energías alternativas handbook. Paraninfo.
- [6] Lopez, G. (2011). Producción de biogas a partir de RSU. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [7] Creus, A. (2014). Energías renovables. Ediciones de la U.
- [8] Harper, E. (2011). Tecnologías de generación de energía eléctrica. Limusa.
- [9] Ortega, M. (2002). Energías renovables. Paraninfo.
- [10] USAID Care. (2016). Manual técnico Instalación y uso de biogas. USAID Care.

Aplicación de la electromiografía superficial de alta densidad en un estudio preliminar en pacientes con neuropatía

Carlos Arturo Carrasco Henao
Corporación Universitaria Minuto de Dios
Colombia

En este capítulo se presentan los resultados de una aproximación a la obtención de información, a partir de la electromiografía superficial de múltiples canales o de alta densidad, a través de la comparación de los efectos que la Diabetes Mellitus Tipo 2 tiene en los potenciales eléctricos en el músculo tibial anterior, esta patología produce alteraciones de los patrones normales de características de las señales cuando es comparada con sujetos de control, esto es evidente en etapas avanzadas de la neuropatía. El proyecto exploró diferencias de las señales en pacientes con diagnóstico relativamente reciente. La electromiografía superficial es una técnica o herramienta de la instrumentación electrónica desarrollada a mediados del siglo XX para estudios sobre la conducción de los nervios motores y el sistema muscular asociado; los avances en este campo multidisciplinar han tenido varios frentes, entre ellos, el desarrollo de los sensores en cuanto a tamaños, materiales y estabilidad; otro frente es el tratamiento de las señales, empezando por su limpieza e integridad pues inherentemente la señal electromiográfica es altamente susceptible a ruidos e interferencias; un tercer frente es la información que se puede obtener de la señal, este tópico se encuentra en el campo estadístico, la introducción en los últimos 15 años de la electromiografía superficial de alta densidad, en donde el número de sensores se ha aumentado y se ubican como una matriz sobre la superficie corporal, ha aumentado, igualmente, las posibilidades y calidad de la información.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 1980, 108 millones de personas tenían diabetes [1, 2], esto es el 4.7% de la población mundial, para el año 2019 se estimaron 463 millones con esta condición, esto es, 8.3% de la población mundial, para Colombia en el año 2014 se tuvo 8.0% de prevalencia de diabetes con una base de 48,29 millones de habitantes [3]. Entre el 60% y 70% de las personas diabéticas presentan una complicación consecuente a la enfermedad [4]: la neuropatía diabética, que se manifiesta con alteración de la marcha y del equilibrio, disminución o pérdida de la sensibilidad en miembros inferiores, disminución o pérdida de la propiocepción y, en fases avanzadas, se puede complicar llegando al denominado pie diabético. En personas con diabetes, los nervios se deterioran por la disminución del flujo sanguíneo y el incremento del nivel de azúcar en la sangre. Generalmente los síntomas de la enfermedad se manifiestan muchos años después del diagnóstico inicial de diabetes.

Debido al alto impacto de la enfermedad y la carencia de sistemas adecuados para apoyar al especialista en el diagnóstico temprano de las alteraciones de la actividad eléctrica de los músculos afectados, se hace necesario el desarrollo de herramientas o técnicas de diagnóstico que faciliten la detección de las alteraciones, su nivel de afectación, la identificación de patrones de comportamiento y el grado de evolución de las alteraciones debidas a la enfermedad. La literatura reporta pocas experiencias en donde se realicen correlaciones entre la patología y la aplicación de la electromiografía superficial [5], en menor medida ha utilizado la se utiliza la electromiografía superficial de múltiples canales o de alta densidad (HD-EMG), desde el enfoque de la ingeniería el presente proyecto incursionó en el estudio de esta técnica, a partir de experiencias previas mostradas en los reportes de Watanabe et al. [6] y Butugan et al. [7], en donde se aplica la técnica HD-SEMG en el estudio de pacientes con Diabetes Mellitus Tipo 2 (DMT2).

Este informe muestra los resultados del análisis de datos obtenidos con la técnica de la HD-SEMG realizados al Músculo Tibial Anterior (MTA), uno de los músculos responsables de la marcha humana. Los resultados se obtuvieron a partir de un estudio comparativo entre dos poblaciones: un grupo de personas con diagnóstico de DMT2 y un grupo de control, en donde se realizó un experimento con la aplicación de un protocolo específico para la captura de señales electromiográficas en el MTA y el análisis de características de las señales como fueron: el coeficiente de correlación, la entropía y la divergencia Kullbak-Leibler (DKL).

La organización del capítulo presenta los aspectos teóricos sobre las propiedades eléctricas de los músculos, el concepto de la HD-SEMG, los aspectos matemáticos del procesamiento de señales, el procedimiento experimental que incluye la instrumentación y el protocolo de experimentación, los análisis estadísticos de resultados, discusión y recomendaciones.

2. MARCO TEÓRICO

En el funcionamiento del músculo esquelético ocurren dos fenómenos [8], el mecánico y el eléctrico; el primero se refiere a cómo los músculos mueven cargas mediante la contracción isotónica (responder a un esfuerzo constante modificando la longitud del músculo) o la contracción isométrica (responder a un cambio de esfuerzo sin modificar la longitud del músculo), y el segundo ocurre por el movimiento de iones (cargas eléctricas) provocada por la liberación de neurotransmisores de la neurona motora a la pared celular de la fibra muscular (unión neuromuscular). En la Figura 1 se muestra la Unidad Motora (UM), lugar fisiológico en donde se inicia la contracción muscular.

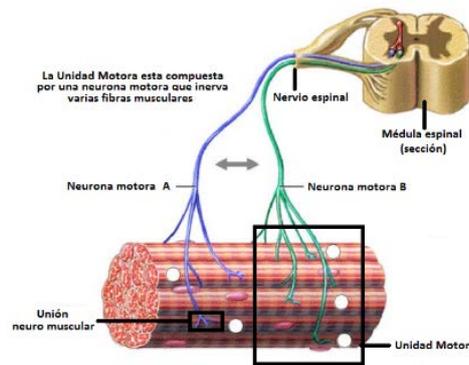


Figura 1. Unidad Motora. Adaptado de Silverthorn [8]

La UM está compuesta por una neurona motora que controla un grupo de fibras musculares. El número de fibras por neurona va desde unas pocas (3 a 10) para movimientos finos (p.ej. músculos de los párpados) hasta 2000 (p.ej. músculo Gastrocnemius). Un músculo puede ser inervado por varias neuronas motoras que actúan de manera asincrónica, es decir, cuando unas actúan otras se inhiben. Según Guyton [9], la fuerza muscular ejercida durante una contracción voluntaria es controlada mediante dos estrategias fundamentales: el reclutamiento muscular, esto es, la activación progresiva de UM en proporción a la demanda de fuerza, aumentando la intensidad de la respuesta muscular; la segunda estrategia es la incorporación progresiva de UM pequeñas o de pocas fibrillas a UM grandes o de muchas fibrillas, con pequeños esfuerzos sólo se reclutan UM pequeñas estas se caracterizan por tener mayor capacidad de recuperación (poca fatiga). Los esfuerzos que requieren contracción sostenida, esto es, cuando se genera un tren de potenciales de acción, la estrategia consiste en activar unas unidades motoras y cambiar a otras en la medida que dure la contracción para disminuir la fatiga, esto se denomina reclutamiento asincrónico.

En las siguientes secciones se trata el tema de las propiedades eléctricas de los músculos, la medición de los voltajes eléctricos mediante la HD-SEMG y los aspectos matemáticos teóricos aplicados a las señales registradas utilizados en la presente investigación.

2.1 Propiedades eléctricas de los músculos

La difusión de iones sodio, potasio, calcio (como cationes) y cloro (como anión) a través de la pared celular crean una diferencia de potencial entre la parte externa e interna de la fibra o célula muscular por la acumulación de cargas a cada lado; el campo eléctrico producido ocasiona una migración de los iones en sentido contrario al de la difusión; los fenómenos simultáneos de difusión y campo eléctrico permiten mantener un equilibrio dinámico del potencial eléctrico llamado potencial de reposo. Los fenómenos eléctricos se describen, brevemente, en los siguientes apartados: el Potencial de Reposo (PR), el Potencial de Acción (PA) y la medición del voltaje con la técnica HD-SEMG con un ejemplo en la determinación de la Zona de Inervación (ZI).

- *Potencial de reposo.* En la Figura 2 se muestra representación simplificada de la membrana celular en donde las concentraciones de iones, positivos y negativos, se encuentran, como se ha indicado, en equilibrio dinámico: los iones migran a través de la pared celular buscando mantener una concentración igual a ambos lados (difusión) y por efecto del potencial eléctrico los iones se desplazan a un mayor o menor potencial dependiendo de su carga eléctrica; el potencial o voltaje eléctrico neto de estos movimientos de carga es de -70 [mV], aproximadamente, dando lugar al PR.

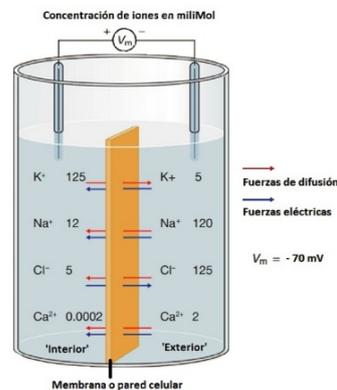


Figura 2. Representación del potencial de reposo en la membrana celular. Adaptado de Fletcher [10].

- *Potencial de acción.* Todas las células corporales mantienen un voltaje a través de su membrana o pared celular [10]; las neuronas y las células musculares son bioquímicamente excitables generando en su membrana cambios

en el voltaje o PA. En la Figura 3 se muestra, secuencialmente, el mecanismo de generación del PA entre el axón de la neurona motora y la fibra muscular: en la unión neuro muscular, las moléculas del neurotransmisor Acetil Colina (ACh) son liberadas desde el axón terminal de la neurona motora [11], estas se fijan en los receptores específicos de ACh de la fibra muscular, la fijación del neurotransmisor provoca un cambio en el potencial eléctrico de la placa terminal motora que a su vez dispara el PA en la membrana celular, membrana citoplasmática o sarcolema, de la fibra muscular.

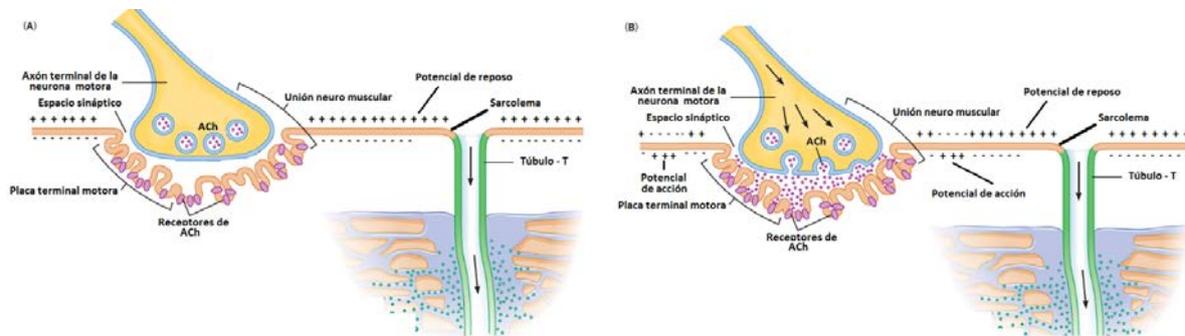


Figura 3. Mecanismo de generación del PA: (A) unión neuromuscular en reposo, (B) generación del PA. Adaptado de Stanfield [11]

El perfil eléctrico del PA consta de tres fases, como se muestra en la Figura 4, en la fase uno o despolarización el voltaje cambia rápidamente desde el potencial de reposo de -70 [mV] hasta $+30$ o $+100$ [mV], cuando el estímulo supera el umbral de -55 [mV] se produce la despolarización; en la segunda fase o repolarización se restituye la condición o concentración de iones del PR; en la tercera fase se tiene la hiperpolarización que se da por la migración un poco más lenta de iones de potasio en el restablecimiento del PR.

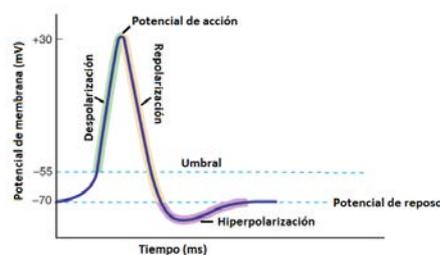


Figura 4. Fases del potencial de acción. Adaptado de Stanfield [11]

2.2 HD-SEMG y la zona de inervación

La electromiografía superficial es una técnica de captura, mediante dos electrodos o sensores, y registro de señales bioeléctricas que provienen específicamente de los músculos [12], es una técnica no invasiva complementaria a la electromiografía con agujas. La electromiografía superficial presenta fuentes de ruido como el cambio de impedancia debida al espesor del tejido entre la fuente del voltaje y el sensor o electrodo [13]; la distancia, material y tamaño de los electrodos; los movimientos de cables o de artefactos y la interferencia de la frecuencia de línea o de la fuente de alimentación, generalmente ruido de 60 [Hz]. La HD-SEMG es un refinamiento de la técnica debido al aumento del número de electrodos que conforman una matriz pues permite obtener resultados temporales y espaciales o de distribución en una superficie (topográficos); con la HD-SEMG se puede mejorar la detección y cálculo de la velocidad de propagación de la señal eléctrica a través de los músculos que puede ser alterada por diversas patologías [6, 7].

En la Figura 5 se muestra la forma teórica de un PA de la UM cuando se usan electrodos superficiales configurados en forma diferencial, según Nishihara et al. [14] la Zona de Inervación (ZI) es la zona de unión de las neuronas motoras y sus correspondientes fibras musculares. El PA generado en la ZI se propaga bilateralmente y a lo largo de la fibra muscular; en una gráfica electromiográfica así construida el PA diferencial aparece invertido a partir de la ZI. La forma de onda normal tiene tres picos definidos uno de ellos es pequeño comparado con los otros dos. La propagación de la señal se atenúa y culmina en los tendones o puntos de inserción muscular.

En la parte C de la Figura 5 se muestran las señales de una disposición matricial de sensores (en la figura una columna), el análisis de la señal permite determinar el tiempo del pulso u onda característica y para el cálculo o ubicación de la ZI se deberían promediar una cantidad de estos pulsos durante una maniobra de contracción voluntaria, en la secuencia se muestra como la onda típica es mejor definida en la medida que aumenta el número de pulsos promediados. Para efectos prácticos la señal de la HD-SEMG es la adición de cientos de potenciales de acción de las fibras musculares de acuerdo con las estrategias de reclutamiento; cada UM descarga entre 6 a 40 veces por segundo, como se ha indicado esto depende del músculo bajo examen.

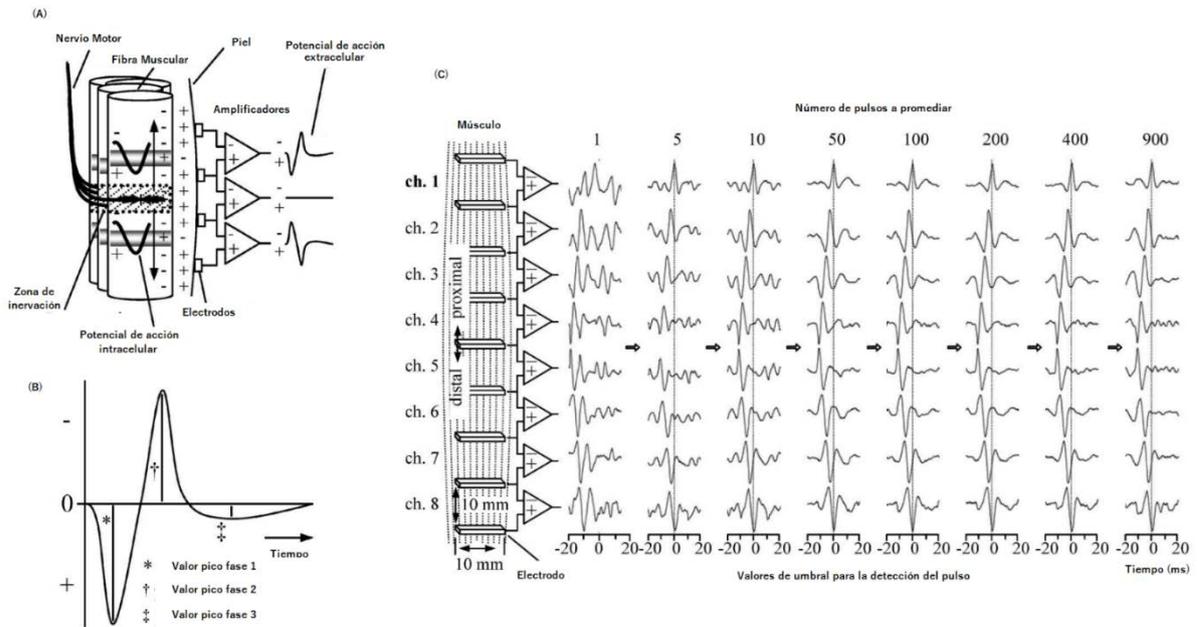


Figura 5. (A) Disipación del PA a partir de la ZI, (B) Fases típicas de la forma de onda del PA y (C) Determinación de la ZI a partir del registro de la HD-SEMG. Adaptado de Nishihara [14]

2.3 Características de las señales HD-SEMG

Las características de las señales HD-SEMG han sido estudiadas en músculos de miembro superior [5] como el bíceps, triceps y deltoides, las condiciones o variables generales que han sido estudiadas están enfocadas en la construcción de sensores y distancia inter electrodos, tipos de contracción muscular (isométrica o isotónica), los análisis están basados en los valores absolutos promedio, raíz cuadrática media, amplitudes absolutas de las formas de onda, cruce por cero, coeficientes de modelos auto regresivos. Las características que pueden extraerse de un conjunto de señales bidimensional están principalmente basadas en mapas de valores de la raíz cuadrática media (rms) o de valores promedio [15,16], por lo general se realizan comparaciones en ventanas temporales de 125 [ms], 500 [ms] o 1 [s]. En este trabajo se revisaron, a partir de valores rms, los coeficientes de correlación, la entropía y la divergencia Kullback-Leibler (DKL).

- *Coficiente de correlación de la raíz cuadrática media.* La ecuación (1) representa una secuencia de valores $x(n)$, y la ecuación (2) el valor efectivo de la señal o valor rms.

$$\{x(n)\}_0^{N-1} \quad (1)$$

$$rms\{x(n)\} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_n x^2(n)} \quad (2)$$

Donde N es el número elementos de la secuencia. Además, se puede construir un mapa de los valores rms cuando se tiene un conjunto de señales provenientes de la HD-SEMG de una matriz de sensores [6], esto se muestra en la ecuación (3).

$$\begin{matrix} S_{N,1,1} = rms_{(1)}\{x(n)\} & S_{N,1,2} = rms_{(f+1)}\{x(n)\} & \dots & S_{N,1,c} = rms_{(fc-f+1)}\{x(n)\} \\ S_{N,2,1} = rms_{(2)}\{x(n)\} & S_{N,2,2} = rms_{(f+2)}\{x(n)\} & \dots & S_{N,2,c} = rms_{(fc-f+2)}\{x(n)\} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{N,f,1} = rms_{(f)}\{x(n)\} & S_{N,f,2} = rms_{(2f)}\{x(n)\} & \dots & S_{N,f,c} = rms_{(fc)}\{x(n)\} \end{matrix} \quad (3)$$

Donde $rms_{(NumeroCanal)}\{x(n)\}$ es el valor rms de cada canal, f es el número de filas de la matriz y c el número de columnas de la matriz de sensores; se resume la ecuación (3) en la ecuación (4) como un vector de valores rms.

$$S_N = \{S_{N,1,1}, S_{N,2,1}, \dots, S_{N,f,c}\} \quad (4)$$

Para determinar el cambio del valor rms en intervalos de tiempo, se divide el segmento de datos $\{x(n)\}_0^{N-1}$ en k segmentos con longitud L , como se muestra en la ecuación (5).

$$L = \frac{N}{k} \quad (5)$$

Las ecuaciones (6) y (7) muestran como es cada segmento.

$$\begin{aligned} x_i(n) &= x(iL + n) \\ 0 < i < k - 1 \\ 0 < n < L - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$L = L_i = L_0 = L_1 = \dots = L_{k-1} \quad (7)$$

El valor rms de cada segmento se muestra en la ecuación (8),

$$\text{rms}\{x_i(n)\} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_n x_i^2(n)} \quad (8)$$

Por lo tanto, se obtendrán k vectores de valores rms (ecuación (9)).

$$\begin{aligned} S_{L_0} &= \{S_{L_0,1,1}, S_{L_0,2,1}, \dots, S_{L_0,f,c}\} \\ S_{L_1} &= \{S_{L_1,1,1}, S_{L_1,2,1}, \dots, S_{L_1,f,c}\} \\ &\dots \\ S_{L_{k-1}} &= \{S_{L_{k-1},1,1}, S_{L_{k-1},2,1}, \dots, S_{L_{k-1},f,c}\} \end{aligned} \quad (9)$$

Se puede calcular el coeficiente de correlación entre los vectores de la ecuación (9), utilizando el primer vector como referencia, si Y representa los segmentos desde L_1 hasta L_{k-1} , se obtienen los coeficientes de correlación ρ para cada comparación, el desarrollo se muestra de las ecuaciones (10) a (14).

$$\rho_{S_{L_0}, S_Y} = \frac{m_{1Y}}{\sqrt{m_{10} m_{0Y}}} \quad (10)$$

$$m_{1Y} = \sum_{i=1}^{f,c} (S_{L_{0i}} - \bar{S}_{L_0})(S_{Y_i} - \bar{S}_Y) \quad (11)$$

$$m_{10} = \sum_{i=1}^{f,c} (S_{L_{0i}} - \bar{S}_{L_0})^2 \quad (12)$$

$$m_{0Y} = \sum_{i=1}^{f,c} (S_{Y_i} - \bar{S}_Y)^2 \quad (13)$$

Con lo que se obtiene un vector con los coeficientes de correlación de la rms.

$$\rho = \{\rho_{S_{L_0}, S_{L_1}}, \rho_{S_{L_0}, S_{L_2}}, \dots, \rho_{S_{L_0}, S_{L_{k-1}}}\} \quad (14)$$

- *Entropía.* Las ecuaciones (15) y (16) muestran la normalización de la ecuación (9).

$$\begin{aligned} E_{L_0,1,1} &= \frac{(S_{L_0,1,1})^2}{[(S_{L_0,1,1})^2 + (S_{L_0,2,1})^2 + \dots + (S_{L_0,f,c})^2]} \\ E_{L_0,2,1} &= \frac{(S_{L_0,2,1})^2}{[(S_{L_0,1,1})^2 + (S_{L_0,2,1})^2 + \dots + (S_{L_0,f,c})^2]} \\ &\dots \\ E_{L_0,f,c} &= \frac{(S_{L_0,f,c})^2}{[(S_{L_0,1,1})^2 + (S_{L_0,2,1})^2 + \dots + (S_{L_0,f,c})^2]} \end{aligned} \quad (15)$$

De manera similar, para los elementos subsecuentes se tienen los vectores normalizados con la ecuación (16).

$$\begin{aligned} E_{L_0} &= \{E_{L_0,1,1}, E_{L_0,2,1}, \dots, E_{L_0,f,c}\} \\ E_{L_1} &= \{E_{L_1,1,1}, E_{L_1,2,1}, \dots, E_{L_1,f,c}\} \\ &\dots \\ E_{L_{k-1}} &= \{E_{L_{k-1},1,1}, E_{L_{k-1},2,1}, \dots, E_{L_{k-1},f,c}\} \end{aligned} \quad (16)$$

La entropía para cada vector se calcula con la ecuación (17).

$$\begin{aligned} \text{Entr}_0 &= -\sum_{i=1, j=1}^{f,c} E_{L_0,i,j} \log_2 E_{L_0,i,j} \\ \text{Entr}_1 &= -\sum_{i=1, j=1}^{f,c} E_{L_1,i,j} \log_2 E_{L_1,i,j} \\ &\dots \\ \text{Entr}_{k-1} &= -\sum_{i=1, j=1}^{f,c} E_{L_{k-1},i,j} \log_2 E_{L_{k-1},i,j} \end{aligned} \quad (17)$$

Donde $j = \{1,2, \dots, 55\}$, con lo que se obtiene un vector con los valores de entropía de la rms normalizada (ecuación (18)).

$$Entr = \{Entr_0, Entr_2, \dots, Entr_{k-1}\} \quad (18)$$

- **Divergencia Kullbak-Leibler.** Las ecuaciones (19) a (21) muestran el desarrollo para la obtención de la DKL, la densidad espectral de potencia (PSD) de las señales, es calculada por el método Welch-Bartlett [17]; a partir de la PSD obtenida se calcula la DKL en segmentos de datos con la misma división en intervalos de tiempo de 1 [s] como en la correlación (ecuaciones (5) - (7)); para cada intervalo se calcula la PSD, por lo tanto, se obtendrán k vectores de PSD.

$$\begin{aligned} R_{L_0} &= \{R_{L_0,1,1}, R_{L_0,2,1}, \dots, R_{L_0,f,c}\} \\ R_{L_1} &= \{R_{L_1,1,1}, R_{L_1,2,1}, \dots, R_{L_1,f,c}\} \\ &\dots \\ R_{L_{k-1}} &= \{R_{L_{k-1},1,1}, R_{L_{k-1},2,1}, \dots, R_{L_{k-1},f,c}\} \end{aligned} \quad (19)$$

La DKL entre dos PSD se calculó con la ecuación (20).

$$\Delta_{KL}(R_{aj}, R_{bj}) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \left(\frac{R_{aj}}{R_{bj}} - \log \frac{R_{aj}}{R_{bj}} - 1 \right) \quad (20)$$

Con lo que se obtiene un vector con las DKL (ecuación (21)).

$$\Delta_{KL} = \{\Delta_{KL}(R_{L_0j}, R_{L_1j}), \Delta_{KL}(R_{L_0j}, R_{L_2j}), \dots, \Delta_{KL}(R_{L_0j}, R_{L_{k-1}j})\} \quad (21)$$

3. MÉTODO

3.1 Instrumentación

Se utilizó una matriz de sensores de Ag/AgCl compuesta de 64 electrodos (OTBIOELECTTRONICA, ELSCH064R3S), con distancia interelectrodo de 8 mm; 64 preamplificadores con ganancia 5x (OTBIOELECTTRONICA, AD1x16SD5) y un instrumento de adquisición multicanal (OTBIOELECTTRONICA, EMG-USB2). El instrumento se configuró en modo de adquisición diferencial, frecuencia 2048 [muestras / segundo], resolución digital de 12 bit, configuración de filtros pasa alta a 3 [Hz] y pasa baja a 500 [Hz], ganancia 200x, con esto se obtuvo una ganancia total de adquisición de 1000x. En la Figura 6, se muestra la disposición de la numeración de electrodos, la numeración de salidas de la matriz a preamplificadores, y la conformación de la señal diferencial, con esto se obtuvieron 55 canales efectivos.

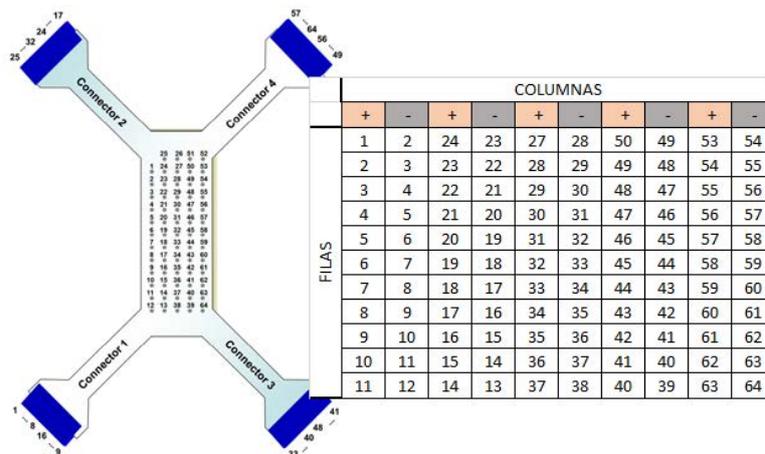


Figura 6. Disposición de electrodos en la matriz y configuración diferencial de las señales

3.2 Procesamiento

Los datos generados por el instrumento (formato .csv) son post procesados en un aplicativo desarrollado con la herramienta de programación matemática MATLAB, se limitó la banda mediante un filtro Bessel de 10 a 450 [Hz], para la eliminación de la interferencia de la línea de alimentación se utilizó el filtro estadístico propuesto por Keshtkaran et al. [19], este consta de cuatro partes: un filtro Notch para la estimación de la frecuencia fundamental, generación de armónicos con un oscilador de tiempo discreto, determinación de la amplitud y fase de los armónicos con un filtro Recursive Least Square (RLS) y substracción de la señal así generada de la señal inicial.

Las características extraídas para comparar fueron, el coeficiente de correlación, la entropía basada en la normalización de la señal rms y la DKL basada en la densidad espectral de potencia.

3.3 Desarrollo experimental

Se reclutaron siete personas con diagnóstico de DMT2 y siete personas o sujetos de control. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los principales factores de la muestra.

Tabla 1. Resumen de factores de la muestra

Variable	DMT2			CONTROL		
	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
Edad (años)	61,0	43,0	80,0	51,0	32,0	67,0
Peso (Kg)	73,3	57,9	94,9	74,3	65,3	87,6
Estatura (m)	1,63	1,43	1,75	1,63	1,54	1,70
Índice de masa corporal (Kg/m ²)	27,42	22,03	32,86	27,85	23,99	32,02

En la Figura 7 se muestra la secuencia o proceso para la realización del experimento en un paciente y el protocolo aplicado: a) discusión de aspectos técnicos generales médico (neurólogo) e ingeniero; b) y c) explicación a paciente sobre el procedimiento; d) Firma de consentimiento informado; e) marcación y ubicación teórica de la zona de inervación del músculo tibial anterior según las recomendaciones de Barbero et al. (16); f) ubicación de matriz de sensores; g) aseguramiento del sensor al músculo; h) revisión de registro adecuado en aplicativo; i) inicio de captura de datos en reposo; j) registro de datos a la máxima contracción voluntaria (isométrica); k) retiro de la instrumentación; l) limpieza de paciente y terminación del proceso.

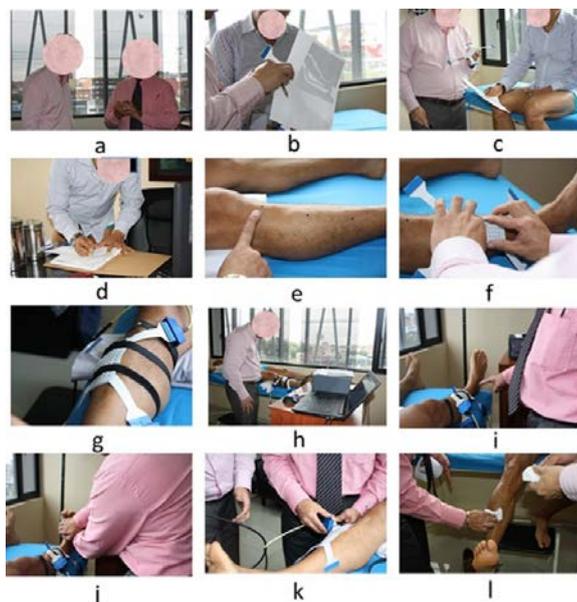


Figura 7. Secuencia de la aplicación de protocolo durante el desarrollo experimental

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Figura 8 y en la Figura 9 se presenta un ejemplo de la señal temporal obtenida de cada uno de los canales (55 canales, según lo explicado anteriormente para un ensayo del grupo de pacientes con DMT2 y un ensayo del grupo de CONTROL respectivamente, esto a la MCV. En general se logra una mejor distinción del momento del reclutamiento de la unidad motora para el grupo CONTROL que para los pacientes DMT2.

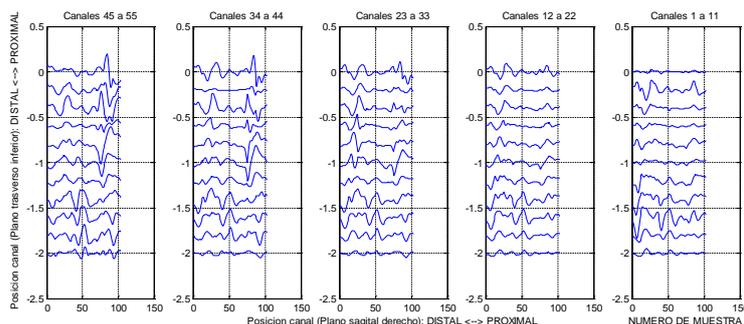


Figura 8. Señal temporal todos los canales. Grupo DMT2

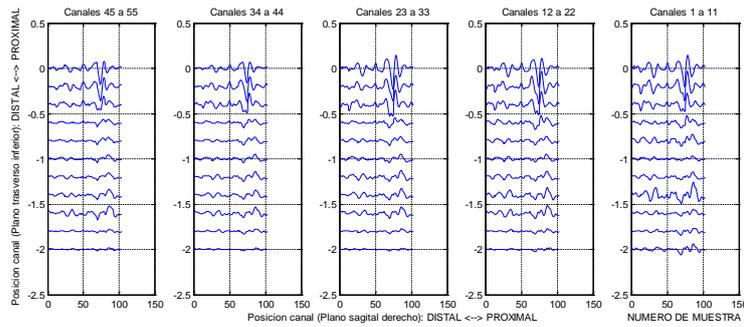


Figura 9. Señal temporal todos los canales. Grupo Control

En la Figura 10, se muestra la comparación entre la muestra de control y la muestra DMT2 de los coeficientes de correlación calculados en cada segmento comparados con el primero de ellos y los correspondientes intervalos de confianza de cada comparación para el número de muestras; en la Tabla 2 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) correspondiente.

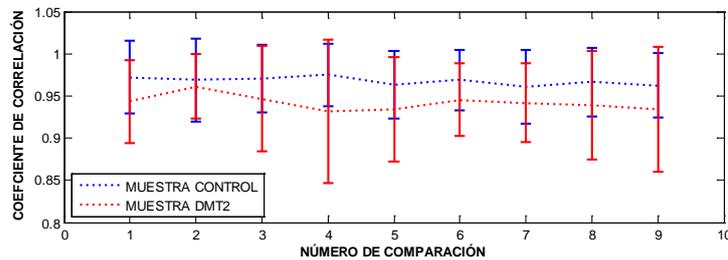


Figura 10. Coeficiente de correlación de la RMS para la MCV en el músculo TA.

Tabla 2. ANOVA coeficiente de correlación de la rms ($\alpha = 0,05$)

Fuente de varianza	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico de prueba (F)	p-value
Tipo de muestra	0,00296	1	0,00296	67,1	0,00004
Número de comparación	0,00047	8	0,00006	1,3	0,35076
Error	0,00035	8	0,00004		
Total	0,00378	17			

Según la Tabla 2, existen diferencias significativas entre los valores medios comparados entre la muestra CONTROL y la muestra con DMT2 para el coeficiente de correlación de la RMS, siendo el valor medio de CONTROL superior en cualquier comparación con la muestra DMT2; sin embargo, el solapamiento de los intervalos de confianza en el análisis de medias no permite, para el número de muestras registradas, determinar inferencias concluyentes sobre las poblaciones. De otra parte, no existen diferencias significativas en las comparaciones (segunda fuente de varianza), se debe recalcar que cada comparación corresponde a intervalos de un segundo de registro de la CMV, esto corrobora el hecho de que no se llegó durante el experimento a niveles de fatiga muscular.

En la Figura 11, se muestra el resultado del cálculo de la Entropía y en la Tabla 3 el Análisis de Varianza (ANOVA) correspondiente.

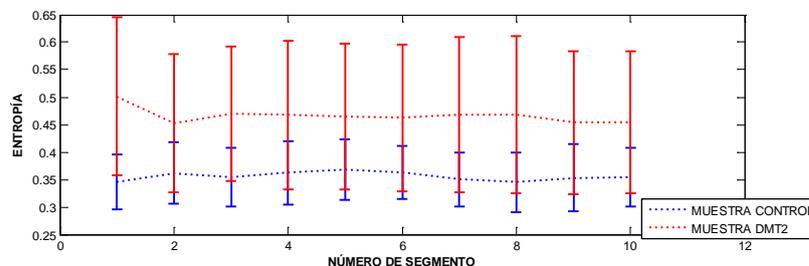


Figura 11. Entropía para la MCV del músculo TA

Tabla 3. ANOVA de la entropía ($\alpha = 0,05$)

Fuente de varianza	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico de prueba (F)	p-value
Tipo de muestra	0,06116	1	0,06116	337,14	0,0006
Secuencia	0,00069	9	0,00008	0,42	0,8925
Error	0,00163	9	0,00018		
Total	0,06348	19			

Según la Tabla 3, existen diferencias significativas en los valores medios de la EM entre la muestra CONTROL y la muestra con DMT2, los valores absolutos son mayores para la muestra DMT2, esto puede significar una mayor homogeneidad en la distribución de la energía (evaluada como valor RMS), esto es un reclutamiento homogéneo de las UM, en el caso de la muestra CONTROL el reclutamiento está focalizado en alguna zona del músculo; dada el solapamiento de los intervalos de confianza no es posible realizar inferencias concluyentes sobre las poblaciones bajo análisis.

En la Figura 12, se muestra el resultado del cálculo de la Divergencia KL para las DEP y en la Tabla 4 el Análisis de Varianza (ANOVA) correspondiente.

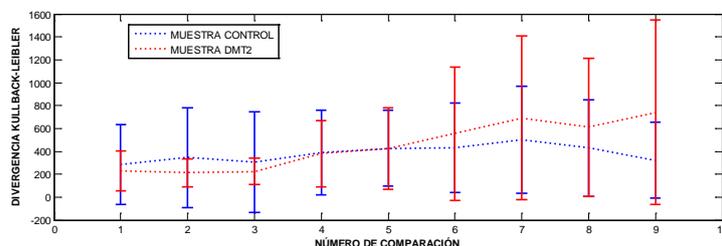


Figura 12. DKL para la MCV en el músculo tibial anterior

Tabla 4. ANOVA de la DKL ($\alpha = 0,05$)

Fuente de varianza	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Estadístico de prueba (F)	p-value
Tipo de muestra	22297	1	22297	1,47	0,2607
Número de comparación	262157	8	32770	2,15	0,1493
Error	121750	8	15219		
Total	406204	17			

Según la Tabla 4, no existen diferencias significativas en la estimación del valor medio de la DKL con el método de cálculo propuesto si se comparan las muestras de las poblaciones (CONTROL vs. DMT2). El solapamiento del intervalo de confianza de la estimación de los valores médicos no permite realizar inferencias sobre la población.

El reporte publicado por Watanabe [6] se realizó con base en mediciones al músculo Vastus Lateralis (VL), comparativamente con el TA es un músculo más largo, más grueso, tiene mayor espesor del tejido adiposo, lo cual afecta la HD-SEMG; según Barbero [16], quien realiza una calificación relativa de la calidad de la información que puede obtenerse de electromiografía superficial en donde incluye criterios como calidad de la señal (discriminación con respecto al ruido), área libre de zonas de inervación (donde la actividad eléctrica es muy baja o nula), propagación de la señal fisiológica e identificación de las unidades motoras, es más fácil la determinación de características en el músculo VL que en el TA, sin embargo, el TA está asociado a las afectaciones que los pacientes con DMT2 tienen en etapas de complicaciones de la enfermedad (pérdida de sensibilidad, dificultad para la marcha, amputación), por lo tanto es de suponer que la afectación puede ser más visible en el TA que en el VL.

5. CONCLUSIONES

Se ha implementado la instrumentación necesaria y el protocolo de pruebas necesarias que permiten extraer algunas características de señales electromiográficas mediante la técnica de la HD-SEMG, esto para realizar el estudio del comportamiento del músculo TA de manera comparada entre una muestra de población de control y una muestra de población con DMT2.

Se compararon algunas características de las señales electromiográficas que se pueden extraer de la HD-SEMG, como son los coeficientes de correlación de un arreglo de sensores, la entropía y la divergencia o distancia de Kullback-Leibler. En las tres características analizadas se presenta un traslape importante de los intervalos de confianza de los valores medios obtenidos, la recomendación para lograr el mejoramiento estadístico es el aumento en el número de respuestas o sujetos de medición.

Se obtuvieron diferencias significativas en los valores promedio de los coeficientes de correlación y la entropía, pero no así en la DKL.

Algunos aspectos para mejorar pueden resumirse en lo siguiente:

- Para asegurar la base de conocimiento sobre la técnica se deben ampliar los estudios a otros músculos de miembro inferior (por ejemplo, gastrocnemius medialis, gastrocnemius lateralis, vastus lateralis), realizar mayores discriminaciones en cuanto a la condición demográfica de la población (edad, peso, estatura, antigüedad de diagnóstico de la enfermedad, sexo, entre otras). Igualmente se deben ampliar las técnicas de procesamiento de

señales, por ejemplo, análisis wavelet, estadísticas de orden superior, análisis de componentes independientes, análisis de correlación canónica, entre otros [12].

- En la Figura 13, se presenta un detalle de la columna de los canales 1 a 11 y un detalle de la estimación de la zona de inervación, para el caso se puede indicar que, para el sujeto bajo análisis esta zona se encuentra entre los canales 6 y 7. Se puede mejorar la obtención de características eliminando la señal del arreglo de esta señal pues como se observa la actividad eléctrica está disminuida y en ocasiones nula, el propósito es realizarlo de manera automática en el postprocesamiento.

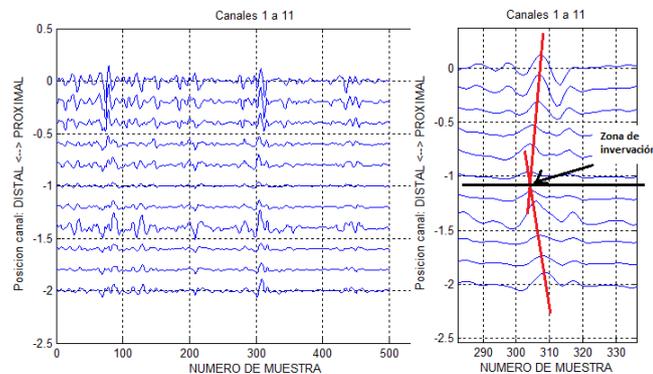


Figura 13. Detalle de señal temporal en todos los canales de una columna y ubicación estimada de la ZI a la MCV

- Con base en una selección de señales temporales adecuadas (como las del detalle mostrado en la Figura 13) se puede realizar un análisis adicional sobre la velocidad de conducción de la señal mioeléctrica a partir de los datos de HD-SEMG.

REFERENCIAS

- World Health Organization. (2016). Global report on diabetes. Recuperado: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/204871/9789241565257_eng.pdf;jsessionid=D4DC78977E1364332BF4E44024A7A597?sequence=1.
- Saeedi, P. et al. (2019). Global and regional diabetes prevalence estimates for 2019 and projections for 2030 and 2045: Results from the International Diabetes Federation. *Diabetes Atlas*.
- World Health Organization. (2016). *Diabetes Country Profiles 2016 - Colombia*. Geneva.
- Scarton, A. et al. (2017). Comparison of lower limb muscle strength between diabetic neuropathic and healthy subjects using OpenSim. *Gait & Posture*, 58, 194–200.
- Rabbi, M. et al. (2019). Significance of electromyography in the assesment of diabetic neuropathy. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 19(3), 1–16.
- Watanabe, K. et al. (2012). Type 2 diabetes mellitus patients manifest characteristic spatial EMG potential distribution pattern during sustained isometric contraction. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 97(3), 468–473.
- Butugan, M. et al. (2014). Multichannel EMG-based estimation of fiber conduction velocity during isometric contraction of patients with different stages of diabetic neuropathy. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 24(4), 465–72.
- Silvethorn, D. (2014). *Human physiology: an integrated approach*. Pearson / Benjamin Cummings.
- Hall, J. (2015). *Textbook of medical physiology*. Saunders.
- Fletcher, A. (2016). Action potential: generation and propagation. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, 17(4), 243–247.
- Stanfield, C. (2013). *Principles of human physiology*. Pearson.
- Chowdhury, R. et al. (2013). Surface electromyography signal processing and classification techniques. *Sensors*, 13, 12431–12466.
- Merletti, R. y Farina, D. (2016). *Surface Electromyography: Physiology, Engineering, and Applications*. IEEE.
- Nishihara, K. et al. (2010). Effect of position of electrodes relative to the innervation zone on surface EMG. *Journal of Medical Engineering and Technology*, 34(2), 141–147.
- Nougarou, F. et al. (2019). Pattern recognition based on HD-sEMG spatial features extraction for an efficient proportional control of a robotic arm. *Biomedical Signal Processing and Control*, 53, 1–12.
- Barbero, M., Merletti, R. y Rainoldi, A. (2012). *Atlas of muscle innervation zones: understanding surface electromyography and its applications*. Springer.
- Manolakis, D., Ingle, V. y Kogon, S. (2005). *Statistical and adaptive signal processing: spectral estimation, signal modeling, adaptive filtering and array processing*. Artech House.
- Hannig, J. y Lee, T. (2004). Kernel smoothing of periodograms under Kullback-Leibler discrepancy. *Signal Processing*, 84(7), 1255–1266.
- Keshtkaran, M. y Yang, Z. (2014). A robust adaptive power line interference canceler VLSI architecture and ASIC for multichannel biopotential recording applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 61(10), 788–792.

Diseño de un nebulizador portátil ultrasónico para el uso en pacientes con enfermedades respiratorias

Ivette Pilarte Centeno
Harry Williams Pérez Cortez
Octavio Daniel Salgado Montoya
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
Nicaragua

Los problemas respiratorios son y han sido la tercera causa de muerte a nivel mundial, la cual es tratada muy comúnmente con nebulizadores de compresión de aire que se encargan de separar los medicamentos líquidos en pequeñas partículas de gotas, para que el paciente pueda inhalar por medio de una mascarilla o una boquilla. De este modo es posible administrar cómoda y fácilmente un medicamento y que llegue directamente a la vía respiratoria, provocando menos efectos secundarios que su administración por otras vías. Estos nebulizadores de compresión de aire suelen utilizar una carga de energía alta, la cual la hacen un poco ineficaz al momento de encontrarse en una zona remota y con problemas de suministros energéticos. El nebulizador portátil por medio de frecuencias ultrasónicas, utilizan una carga energética bastante baja en consideración con los de compresor de aire, por lo cual es funcional con bancos de batería de 1.5 Vdc, 500ma, tanto recargables por cualquier suministro energético, como desechables. Esto hace que el nebulizador pueda ser utilizado en cualquier zona donde se quiera utilizar sin necesidad de requerir inmediatamente a un suministro energético. Este dispositivo funciona por medio de frecuencias ultrasónicas generadas por un oscilador de cristal, la cual debido a su gran frecuencia separa el medicamento líquido en pequeñas gotas para ser inhalado por un paciente. Se desarrolló un prototipo el cual la parte electrónica se adapta por medio de una pulsera de brazo al paciente, saliendo de este, un tubo que va conectado a la mascarilla que contiene el medicamento a aplicar, haciendo un dispositivo con alta movilidad si el paciente necesita ser trasladado de sala o hospital.

1. INTRODUCCIÓN

Las distintas enfermedades respiratorias han causado que a través de los años se busquen distintos métodos para combatir estos problemas respiratorios, siendo según la OMS, la tercera causa de muerte a nivel mundial con un estimado de muerte del 3.46 millones (6.1%), por debajo de las enfermedades como afección cerebrovascular con 10.8% y cardiopatía isquémica con 12.8%.

La evolución tecnológica y las ideas innovadoras que ayuden al ser humano a combatir distintas enfermedades tiene que ser lo primordial en el tiempo que estamos viviendo actualmente. Presentar un prototipo utilizado para mejorar la salud pública aminorando los costos para el mercado comercial, de este modo entrar en competencia ofreciendo un diseño más atractivo, la fiabilidad del producto combina con practicidad para su movilización dando así mayor confort al cliente.

Las variaciones sonoras por frecuencia ha sido la solución para distintas aplicaciones de desinfección ambientales, las cuales su función es separar en pequeñas partículas los productos de limpieza para que tengan una mayor penetración sobre las superficies y zonas donde se quiera tener un ambiente limpio y libres de bacterias y otras partículas perjudiciales para la respiración del ser humano o cultivos de plantas que se estén desarrollando.

El prototipo ideado para nebulizar produce diminutas gotas de medicamentos de un tamaño de entre 1 y 3 micras a través de vibraciones de muy alta frecuencia (1,7MHz) de unos transductores piezoeléctricos, haciendo de este un dispositivo como solución a distintas necesidades de problemas respiratorios.

Por tanto, eso lo hace una mejor propuesta puesto que reinventamos el diseño actual volviéndolo más interesante reduciendo el tamaño y aumentando la efectividad y el transporte. Por consiguiente fue realizado pensando en el hogar favoreciendo su adquisición reduciendo su bajo costo y facilitación de movimiento contando con lo necesario para la resolución de los problemas en el marco de la innovación, sin embargo su aprovechamiento está incluido para personas de escasos recursos especialmente en el ámbito rural dado que no se tiene mucho poder adquisitivo por ello el nebulizador brinda todo los aditamentos para su empleo en las zonas más aisladas del país donde la circulación es menos accesible.

Ahora bien, también es efectivo su empleo en las zonas sin servicio eléctrico, pues debido a su innovación es inalámbrico volviéndolo factible y precisamente la solución recomendable para aliviar el asma, enfermedades pulmonar obstructiva crónica, epoxi, etc. Por otro lado, nuestra visión es positiva sobre el nebulizador ultrasónico presentado al público confiando en el beneficio brindado por sus innovaciones diseño y eficacia confirmando sus capacidades para resolver problemas médicos con el mínimo desperdicio de medicamento proporcionando tranquilidad al consumidor.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Nebulizadores ultrasónicos

Los nebulizadores ultrasónicos son un método de inhalación utilizado para llevar el medicamento a los pulmones de un paciente. Las máquinas están destinadas al uso de aquellos que no pueden usar un inhalador de mano. La palabra nebulizador indica la reducción de un líquido en un vapor fino. El ultrasonido es un método que se puede utilizar para dividir un líquido y convertirlo en partículas más pequeñas a través del uso de ondas sonoras intensas.

Mediante la introducción de la medicación a un proceso ultrasónico de alta frecuencia, el líquido se convierte en una niebla o neblina. Debido a que un nebulizador ultrasónico produce una niebla más uniforme llena de partículas más pequeñas de la medicina, se cree que es un método superior de repartir medicamentos, cuanto más pequeña sea la partícula, más fácil y más profundo podrá penetrar la medicina en los pulmones. Además, los modelos ultrasónicos son más compactos en tamaño, pesan menos que los nebulizadores de compresores, no requieren necesariamente de la dilución de la medicación y hacen mucho menos ruido que aquellos de tipo de compresor.

Algunos nebulizadores ultrasónicos requieren de agua que se añade como un vehículo para el medicamento durante la creación de la niebla y algunos no lo hacen. Los componentes básicos incluyen el transductor (donde la nebulización ultrasónica se lleva a cabo), recipiente del medicamento, la tapa de malla, la boquilla y la máscara. Aquellos ultrasónicos profesionales usados en los hospitales y por médicos estarán equipados con un brazo ajustable que permite el movimiento y el alcance adicional de la boquilla y el tubo de respiración.

Los nebulizadores ultrasónicos requieren medicamentos basados en una solución. Utilizan un líquido de partícula muy pequeño a fin de funcionar correctamente. Los medicamentos en suspensión tales como budesonida se componen de partículas más grandes de medicación que el nebulizador ultrasónico no puede descomponer. Si un medicamento no es del tipo correcto, pero se utiliza en el nebulizador, el proceso ultrasónico no ocurrirá, y será en vano. Existen distintas marcas y distintas formas de equipos para nebulización, de las cuales varían precios y manera de funcionamiento. En las Figuras 1 y 2 se presentan algunos nebulizadores ultrasónicos [1, 2].

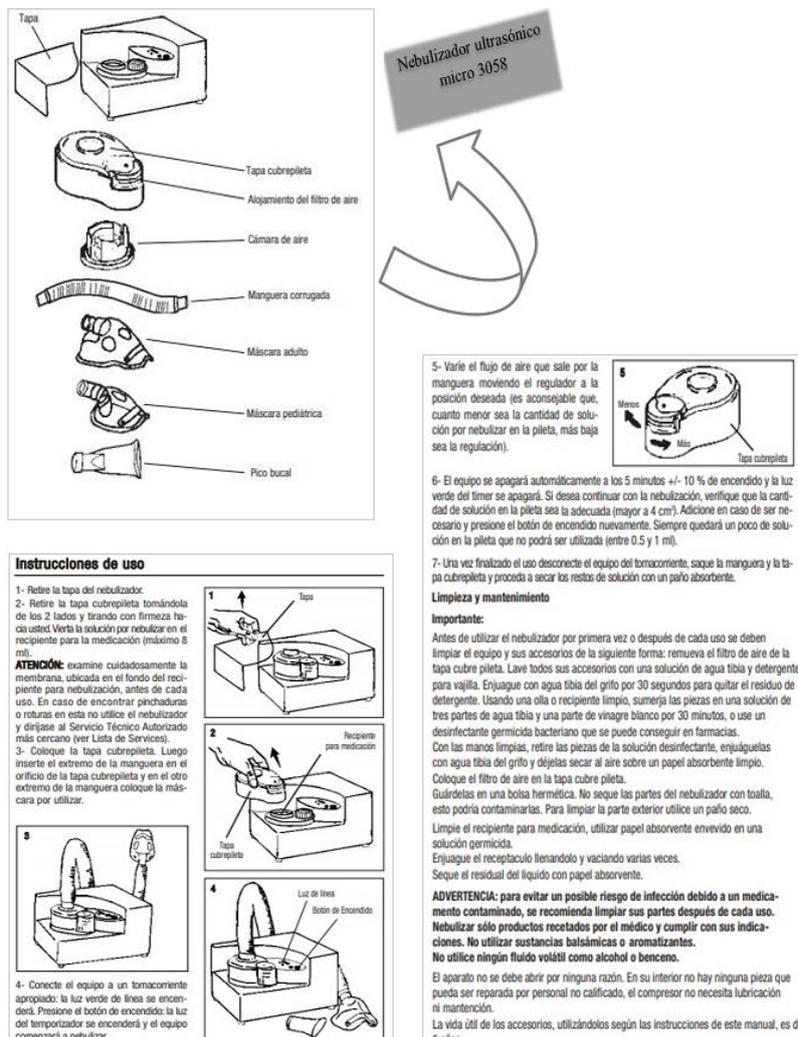


Figura 1. SAN-UP Instrucciones Nebulizador ultrasónico

Remoción del filtro de aire:

Si el filtro de aire se notara sucio o desgastado, reemplázelo de la siguiente manera:

- 1- Retire la cámara de aire de la tapa cubrepileta, presionando con el dedo desde afuera, a través del orificio.
- 2- Presione firmemente el regulador de aire desde adentro hacia afuera de la tapa cubrepileta, hasta desplazarlo de su posición.
- 3- Una vez separado el regulador de aire, reemplace el filtro que se encuentra en su interior.
- 4- Rearme siguiendo el procedimiento inverso.

Especificaciones Técnicas

Método de nebulización: Vibración ultrasónica

Tensión de operación: 220V - 50Hz

Clase:

Consumo: 30W

Nivel de sonido (a 1 m de distancia): 25 dB

Frecuencia de oscilación: 2,5 mHz

Salida de solución: 0,5 ml/min. (mínimo)*

Dimensiones de la partícula: 1,5 - 5,7µm (MMAD 3,8 µm)

Carga máxima de pileta: 0,8 ml

Carga mínima de pileta: 0,1 ml

Peso: 1,2 kg

Dimensiones del aparato: 125 x 175 x 109 mm

Temperatura y humedad de operación: 5 a 40 °C, 30% a 95%

Temperatura y humedad de almacenamiento: 1 a 40 °C, 10% a 95%

Rango de presión atmosférica para transporte y almacenamiento: 50 a 106 kPa (500-1060 mbar)

Ciclo de servicio: 30 min. encendido, 30 min. apagado

*Valor medido con 0,9% de solución de ClNa. Esta especificación puede variar según el tipo y viscosidad de medicamento utilizado.

La Cámara de Agua Corriente contiene una solución de Cloruro de Benzalconio al 0,01%.
Las especificaciones pueden estar sujetas a cambios sin aviso previo.

Accesorios provistos

1 Gotero de 2 ml/ 1 Mascarilla niño/ 1 Mascarilla adulto/ 1 Pico bucal/ 1 Manguera plástica/ 2 Filtros de repuesto




Figura 2. SAN-UP Instrucciones Nebulizador ultrasónico

2.2 Beneficios de la nebulización ultrasónica

- Los nebulizadores ultrasónicos se caracterizan por la forma de dosificar el medicamento, ya que el vapor o niebla que produce es más uniforme.
- Su mayor ventaja es que son compactos, en cuanto a su peso, menor a los otros tipos de nebulizadores y no producen ruido alguno.
- Su facultad de ser portátil, permite, de la manera más práctica que existe, que se pueda trasladar a cualquier sitio a donde vaya el paciente sin que este tenga que abandonar el tratamiento.

Ventajas

- Produce un rápido inicio de acción importante para la terapia de alivio
- Minimiza el riesgo de efectos sistémicos indeseables con la terapia
- Reduce la deposición del medicamento fuera de los pulmones lo cual tiene ventaja de efectividad
- La velocidad de las gotas inhaladas es igual a la tasa de flujo respiratorio de niños y adultos lo que minimiza el impacto en la orofaringe
- No se necesita una técnica específica de inhalación o coordinación
- Nebuliza la mayoría de los fármacos en solución
- Distribuye grandes dosis de medicamento
- Útil en niños y personas incapaces de usar otros dispositivos

Desventajas

- Mantenimiento
- Volumen del nebulizador
- El tiempo consumido
- La solución se contamina fácilmente
- Tiene poca eficiencia de distribución
- Se desperdicia medicamento
- El rendimiento es variable entre modelos y condiciones

La medicación nebulizada puede tener incluso mayores efectos clínicos se le compara con dosis similares o superiores tomadas por vía oral (pastillas) o mediante inyección subcutánea. Los estudios han demostrado que esto puede producir mejores tratamientos que utilizando únicamente inhaladores. La medicación es depositada directamente en el tracto respiratorio, lo que permite una gran concentración de medicamentos en el área a tratar.

3. MÉTODO

Este prototipo tuvo como inicio la necesidad de solventar los problemas que se tienen con nebulizadores de compresor de aire que funcionan solamente con suministro energético, y están ubicados en centros médicos de zonas remotas donde el suministro eléctrico es muy inestable y debido a esto, se le deja de dar un adecuado tratamiento a las personas con problemas respiratorios, causando bastante ineficiencia en los tratamientos médicos, teniendo que requerir al traslado del paciente a los hospitales regionales para la continuidad de su tratamiento médico, generando con esto mayores gastos monetarios para el sistema de salud. Es por ello que este prototipo tiene la finalidad de funcionar por medio de baterías no recargables o recargables ya sea por un pequeño panel solar o por suministro energético.

3.1 Área de propuesta

Se tomó como área de estudio los distintos problemas que presentan los centros médicos rurales conforme a los tratamientos respiratorios utilizando nebulizadores convencionales. Resolviendo problemas en suministro energético, así como el alto valor de adquirir estos nebulizadores por compresión de aire.

3.2 Disponibilidad de materiales en el mercado

Los dispositivos y componentes electrónicos utilizados para desarrollar esta idea, se encuentran mayormente en todas las áreas de mercado, teniendo acceso fácilmente a los distintos materiales.

3.3 Pruebas y ensayos

Una vez finalizado el dispositivo y teniendo funcionamiento visual del mismo, se realizó pruebas con medición de partículas de medicamentos generadas por el mismo dispositivo, obteniendo un rango de 2.3 micras del compuesto del medicamento.

3.4 Propuesta como solución

Debido a la demanda de dispositivos electrónicos que ayuden a combatir los problemas respiratorios, este prototipo se vuelve viable, como una solución temprana, barata y rápida de implementar en las distintas áreas rurales:

- Social: Proporciona mayor comodidad y efectividad, cumpliendo con las mismas funciones que uno comercial.
- Económico: Adquisición de un producto de calidad y bajo costo.
- Ambiental: Ahorra energía eléctrica volviéndolo indispensable como equipo médico para tratar crisis de asma u otras enfermedades respiratorias en donde se presenten.
- Cultural: algunas personas que habitan en las zonas rurales, utilizan infusiones de eucalipto combinada con otras hierbas para aliviar sus problemas respiratorios y esta propuesta es una solución fehaciente y efectiva.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Un nebulizador es un aparato que divide los medicamentos líquidos en muy pequeñas gotas. En el nebulizador se deposita la dosis de medicamento indicada por el médico, que puede consistir en desinflamatorios o broncodilatadores. Se usan en el tratamiento de enfermedades respiratorias crónicas y agudas como asma o EPOC, pero también son útiles para tratar las molestias del resfriado común y enfermedades respiratorias simples.

4.1 Problemas más frecuentes en Nicaragua

Nicaragua por ser un país tropical en varias zonas posee distintas variaciones climatologías, que afectan considerablemente los problemas respiratorios. Por lo cual se deben de buscar soluciones para poder combatir estas enfermedades [3], a continuación, se presenta una estadística de problemas respiratorios comprendidos en los años 2016 y 2017: las probabilidades de contraer una infección respiratoria aguda son de 1,653 por cada mil habitantes (Figura 3). Aunque la influenza o gripe es la enfermedad más común, cada vez son los pobladores que sufren neumonía, una enfermedad que en Nicaragua ha sido el principal motivo de muerte.



Figura 3. Problemas respiratorios en Nicaragua 2016 y 2017

4.2 Componentes y partes

Este prototipo consta de tres partes elementales para su funcionamiento: 1) tarjeta electrónica generadora de alta frecuencia de señales cuadradas, 2) oscilador de cuarzo de cristal con puntos μm , y 3) mascara de nebulización con depósito de medicamento. El funcionamiento del dispositivo es generar señales de alta frecuencia por medio del oscilador de cristal, el cual este al estar en contacto con el medicamento a suministrar, crea por medio de sus puntos μm , una separación del medicamento en pequeñas partículas micras, haciendo el efecto de humo, para poder ser inhalado por el paciente. Por medio del depósito del medicamento se le suministra al paciente la cantidad adecuada de medicamento.

Materiales y componentes utilizados:

- Encapsulado plástico adaptado a pulsera de brazo
- Circuito oscilador de alta frecuencia
- Oscilador Piezoeléctrico de cristal (Figura 4)
- Mascara para nebulizar
- Sistema de carga para baterías de LITION AAA.
- Adaptador de panel solar de 5v

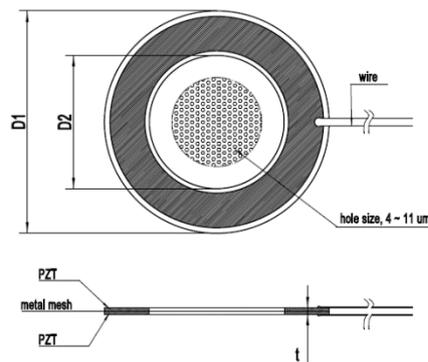


Figura 4. Dimensiones técnicas de oscilador de cristal [www.es.piezodisc.com]

4.3 Prototipo

Las mediciones realizadas con medidor de partículas en el ambiente, con el dispositivo funcionando es de 2.3 micra de componente médico, solo salbutamol, obteniendo una medición dentro de los rangos. Estas pruebas se realizaron en la zona de salida de la mascarilla de nebulización. El prototipo construido se muestra en la Figura 5.

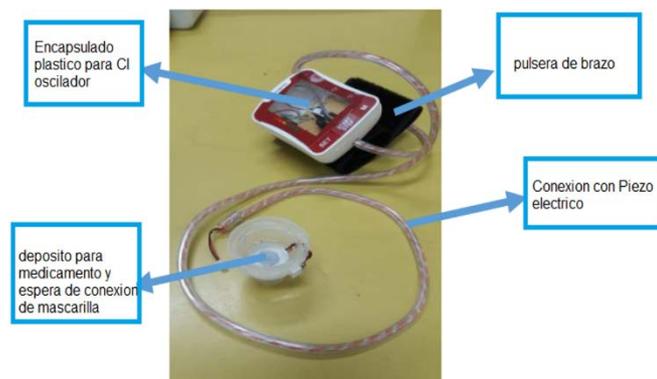


Figura 6. Prototipo nebulizador portátil Ultrasónico

4.4 Principio de acción

Este nuevo dispositivo se basa en el principio de funcionamiento siguiente similar a los comercializados actualmente. Presentando puntos importantes de su funcionamiento internos los expuestos a continuación:

El nebulizador con boquilla funciona mediante un compresor que genera aire comprimido. El aire fluye a través de la solución medicinal y la atomiza en gotas diminutas.

Los nebulizadores ultrasónicos utilizan un vibrador piezoeléctrico que genera vibraciones de alta frecuencia (2-3 millones/seg). Las vibraciones se transfieren a través del depósito de agua a la medicación (el agua sirve como agente refrigerante). Las fuertes vibraciones generan una columna de medicación líquida y se producen pequeñas partículas.

Los nebulizadores de malla consisten en una membrana fina con orificios microscópicos. Un elemento vibratorio empuja la medicación a través de los finos orificios de la membrana. Esto genera un aerosol de pequeñas gotas. Estos nebulizadores son también muy silenciosos y ligeros, por lo que son adecuados para su uso en viajes y para niños.

Beneficios obtenidos:

- Menor dimensiones
- Mayor absorción de los medicamentos como: salbutamol, bromuro de ipatropio
- Menos desperdicio de medicamentos
- Menor impacto en el oro faringe del paciente
- Ergonómico
- Transporte con mayor facilidad
- No realiza ningún sonido
- No necesita de remover el filtro de aire

5. CONCLUSIONES

Con este prototipo de nebulizador ultrasónico se pretende solventar una problemática en el tratamiento de deficiencia respiratoria existente en muchos centros médicos, debido a su bajo costo y fácil uso, se vuelve un dispositivo de alta movilidad. Su composición interna es de un oscilador de alta frecuencia, un piezoeléctrico y una máscara de nebulizar con depósito para medicamento.

La separación del medicamento empleado en el depósito es de 2.3 micra con el dispositivo activo, las cuales son las normadas para el tratamiento de nebulización de una persona. Los tratamientos varían según el medicamento a emplear por el médico de base.

Este prototipo queda como una solución a los problemas de tratamientos para problemas respiratorios, puede usarse sin una conexión al suministro eléctrico, su conexión de carga a un panel solar lo vuelve completamente autónomo al suministro energético de la zona. Su diseño portátil lo vuelve fácil de usar, tanto como el encendido del dispositivo como en el cambio de las mascarillas de nebulización.

REFERENCIAS

- [1] Omron. (2020). Tipos de nebulizador: Nebulizadores con boquilla, de malla y ultrasónicos. Recuperado: <https://www.omron-healthcare.es/es/salud-y-estilo-de-vida/saludrespiratoria/terapia-de-nebulizacion/tipos-de-nebulizador-nebulizadores-con-boquilla-demalla-yultrasonicos.html>.
- [2] Sanup. (2020). Nebulizador ultrasónico micro 3058. Recuperado: <https://d31fzbr90tctqz.cloudfront.net/epi/resource/r/nebulizador>.
- [3] OMS. (2017). Enfermedades más frecuentes de muertes en el mundo. Recuperado: <https://www.who.int/features/qa/18/es>.

Análisis a las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT relacionadas con la propagación de ondas milimétricas que usa la herramienta Xirio online

Guillermo Fernando Valencia Plata
Félix Roberto Gómez Devia
Edgar Fabián Rodríguez Veloza
Universitaria Agustiniana
Colombia

Los casos de uso de 5G podrían ser atendidos potencialmente por una variedad de frecuencias de espectro. Por ejemplo, las aplicaciones de baja latencia y corto alcance (adecuadas para zonas urbanas densas) son probablemente adecuadas para la frecuencia de ondas milimétricas (por encima de 24 GHz). La propagación de señales radioeléctricas está condicionada por factores tales como el tipo de vegetación, el clima u otro tipo de obstáculos presentes en el entorno de las radiocomunicaciones. Esto significa que, al momento de diseñar un sistema de comunicaciones, un elemento fundamental a considerar es la atenuación inherente a la vegetación del suelo donde se va a realizar la comunicación. Estas atenuaciones se pueden predecir usando los métodos de cálculo propuestos por la UIT y es por esto que estos cobran gran importancia. En el presente capítulo se analizan las recomendaciones de la UIT relacionadas con la propagación de ondas milimétricas y que usa la herramienta Xirio online, estas recomendaciones son la UIT-R P.452, UIT-R P.530-17 y UIT-R P.526-13. Para su análisis se realizó una lectura profunda de ellas y se procedió a simular un mismo enlace con cada una para poder compararlas bajo los mismos parámetros. Con lo anterior se vio la importancia de conocer los parámetros que tiene en cuenta cada recomendación para hacer los cálculos y cuáles de estos son los que más atenúan las señales milimétricas.

1. INTRODUCCIÓN

5G es la nueva generación de redes de telefonía móvil y promete entregar a sus usuarios nuevos servicios con velocidades de transmisión del orden de los gibabits/seg. Para cumplir con lo anterior es necesario el uso de espectro en frecuencias superiores a 24 GHz. Es por esto que resulta importante que en Colombia existan estudios respecto a la propagación y atenuación de señales con frecuencias superiores a 24 GHz, estas ondas comúnmente se les denomina milimétricas. La atenuación de las señales depende de parámetros tales como la frecuencia, distancia que debe viajar la señal, potencia de transmisión, objetos (*clutter*) que obstaculicen la propagación, entre otros.

Debido a esto, en la Universitaria Agustiniana los investigadores del programa Ingeniería en Telecomunicaciones formularon el proyecto de investigación denominado *Verificación y validación de las recomendaciones de la UIT, relacionadas con la atenuación de señales milimétricas, para una futura implementación de 5G en Colombia*, en el cual se pretenden realizar salidas de campo para medir las pérdidas que se pueden presentar en una comunicación que use señales con ondas milimétricas. Estas salidas de campo se deben realizar en entornos con diferentes tipos de *clutter* que sean comunes al momento de implementar 5G en Colombia.

Las mediciones realizadas se deben comparar con los resultados que se obtengan al usar las recomendaciones de la UIT a través de la herramienta Xirio online y con base en esta comparación se podrán proponer modificaciones a las recomendaciones en mención y de esta forma la Agencia Nacional del Espectro ANE y la UIT tendrán un panorama más exacto de lo que se puede esperar al implementar 5G en Colombia.

Una etapa del proyecto en mención consta de hacer simulaciones usando la herramienta Xirio online para conocer los resultados teóricos de las recomendaciones de la UIT y de otros métodos de cálculo que use Xirio. En el presente trabajo se hablará y analizarán los métodos de cálculo que usa esta herramienta.

2. MÉTODO

Para simular un enlace punto a punto usando una señal con frecuencia mayor o igual a 24 GHz, conocidas como señales milimétricas, el software Xirio online permite escoger entre alguno de los siguientes métodos de cálculo [1]:

- Recomendación UIT-R P.526
- Deygout
- Recomendación UIT-R P.452
- Recomendación UIT-R P.530-17

Respecto a la recomendación UIT-R P.526 y Deygout, Xirio online indica que son métodos determinísticos basados en difracción, válidos para frecuencias mayores de 30 MHz y se emplean en todos los servicios radioeléctricos en entornos rurales y mixtos siempre que se disponga de cartografía de media o alta resolución. En relación con la recomendación UIT-R P.452 Xirio online especifica que este es un método de cálculo determinístico válido en la gama de frecuencias de 700 MHz a 50 GHz y especialmente recomendado para el cálculo de interferencias en radioenlaces del servicio fijo. Respecto a la recomendación UIT-R P.530-17 el software indica que es un método de cálculo

determinístico válido para frecuencias mayores de 30 MHz e incorpora el análisis de viabilidad de radioenlaces digitales del servicio fijo.

El método de línea de vista proporciona una predicción del nivel de señal únicamente en condiciones en las que existe un trayecto despejado, aplicando la atenuación por espacio libre.

A continuación, se describen más a profundidad los métodos de cálculo mencionados anteriormente, a excepción de la recomendación UIT-R P.526-11 ya que la UIT-R P.526-13 es una versión más actualizada de la misma. Y después se procederá a compararlas usando diferentes situaciones y el simulador Xirio online.

2.1 Recomendación UIT-R P.526

Aunque Xirio online hace uso de las recomendaciones UIT-R P.526-11 [2] y UIT-R P.526-13 [3], se estudiará aquí la recomendación UIT-R P.526-15, puesto que las versiones citadas se encuentran obsoletas. La recomendación UIT-R P.526-15 presenta varios modelos para predecir el efecto de la difracción en la propagación de las ondas, específicamente en la intensidad de campo recibida. Los modelos que presenta la recomendación se aplican a diferentes tipos de obstáculos y diversas geometrías de trayecto, a partir de la premisa que la difracción de las ondas radioeléctricas sobre la superficie de la Tierra se ve afectada por las irregularidades del terreno. La recomendación define los siguientes conceptos básicos necesarios para la comprensión de los modelos.

2.1.1 Elipsoides de Fresnel y zonas de Fresnel

Al estudiar la propagación de las ondas radioeléctricas entre dos puntos A y B, el espacio correspondiente puede subdividirse en una familia de elipsoides, llamados elipsoides de Fresnel, todos con sus focos en los puntos A y B, de manera que cualquier punto M de uno de esos elipsoides satisface la ecuación (1).

$$AM + MB = AB + n \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Donde n es un número entero que caracteriza el elipsoide correspondiente y λ es la longitud de onda. La propagación se efectúa con visibilidad directa, es decir, con fenómenos de difracción despreciables, si no existe ningún obstáculo dentro del primer elipsoide de Fresnel. El radio de un elipsoide, en un punto situado entre el transmisor y el receptor, puede tener un valor aproximado, en unidades coherentes y se puede calcular con la ecuación (2).

$$R_n = \left[\frac{n \lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right]^{1/2} m \quad (2)$$

2.1.2 Anchura de penumbra

La transición de la luz a la sombra define la región de penumbra. Esta transición se produce a lo largo de la franja estrecha (anchura de penumbra) en el límite de la sombra geométrica. En la Figura 1, se ilustra la anchura de penumbra (w) en el caso de un transmisor ubicado a una altura h sobre la superficie lisa de la Tierra esférica, que viene dada por la ecuación (3).

$$w = \left[\frac{\lambda a_e^2}{\pi} \right]^{1/3} m \quad (3)$$

Donde a_e es el radio ficticio de la Tierra, que para efectos de la recomendación será de 8500 km. (Figura 1).

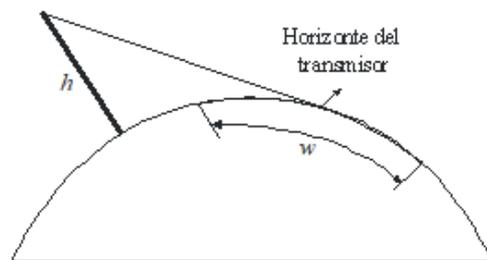


Figura 1. Definición de la anchura de penumbra

2.1.3 Zona de difracción

Zona que se extiende desde la distancia con visibilidad directa (LoS) en la que el trayecto libre de obstáculos es igual al 60% del radio de la primera zona de Fresnel, (R_1), hasta una distancia más allá del horizonte del transmisor en la que predomina el mecanismo de dispersión troposférica.

2.1.4 Criterio de rugosidad de la superficie del obstáculo

Si la superficie del obstáculo tiene irregularidades que no rebasan el valor Δh , calculado a partir de la ecuación (4) y teniendo en cuenta que R es el radio de curvatura del obstáculo, entonces se puede considerar que es un obstáculo de superficie lisa.

$$\Delta h = 0,04[R\lambda^2]^{1/3}m \quad (4)$$

2.1.5 Obstáculo aislado

Si no existe interacción un obstáculo y el terreno circundante. En este caso, la atenuación del trayecto se debe únicamente al obstáculo, sin contribución del terreno. Debe cumplirse que no haya solapamiento entre las anchuras de penumbra de cada terminal y la parte superior del obstáculo; el trayecto libre de obstáculos a ambos lados de los mismos debe ser, al menos, de un valor de 0,6 del radio de la primera zona de Fresnel; no se produce reflexión especular en ninguno de los dos lados del obstáculo.

2.1.6 Tipo de terreno

Dependiendo del valor numérico del parámetro Δh de la Recomendación UIT-R P.310, utilizado para calcular el grado de irregularidades del terreno, pueden distinguirse tres tipos de terrenos:

- *Terreno liso.* Si las irregularidades del terreno son del orden de 0,1R o inferiores a ese valor, donde R corresponde al máximo valor del radio de la primera zona de Fresnel en el trayecto de propagación.
- *Obstáculos aislados.* El perfil del terreno del trayecto está compuesto de uno o más obstáculos aislados.
- *Terreno ondulante.* El perfil lo compone varias colinas pequeñas, pero ninguna representa un obstáculo mayor.

Una vez definidos estos conceptos y con ayuda de las integrales de Fresnel, también planteadas en la Recomendación, se procede a establecer los modelos para predecir el efecto de la difracción en la propagación de las ondas radioeléctricas, así: modelo de difracción en una tierra esférica, modelo de difracción sobre obstáculos aislados o sobre un trayecto terrenal general, modelo de difracción debida a pantallas delgadas y modelo de difracción debida a una cuña de conductividad finita. Finalmente, la recomendación presenta una guía sobre la propagación por difracción, la cual corresponde a un organigrama para evaluar las pérdidas por difracción correspondiente a los dos primeros modelos y el procedimiento que debería adoptarse en cada caso.

2.1.7 Modelo de difracción en una tierra esférica

La recomendación presenta dos métodos para calcular la pérdida adicional de transmisión debida a la difracción en una Tierra esférica: método numérico y por nomograma, a partir de la fórmula clásica de la serie de residuos:

- *Pérdidas por difracción en trayectos transhorizonte.* Para largas distancias transhorizonte, solo es importante el primer término de esa serie de residuos, el cual puede expresarse como el producto de un término de distancia, F, y dos términos de ganancia de altura, G_T y G_R . Mediante el método numérico, en primer lugar, es necesario calcular el grado en que las características eléctricas de la superficie de la Tierra influyen en la pérdida por difracción, lo cual se logra normalizando la admitancia de superficie K, obtenido por las ecuaciones (5) y (6).

$$K_H = \left(\frac{2\pi a_e}{\lambda}\right)^{-1/3} [(\varepsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2]^{-1/4} \quad (4)$$

$$K_V = K_H[\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2]^{1/2} \quad (5)$$

Donde ε es la permitividad relativa efectiva y σ corresponde a la conductividad efectiva (S/m). Si K es menor de 0,001, las características eléctricas de la Tierra no revisten importancia. Para valores de K mayores de 0,001 e inferiores a 1, pueden utilizarse las ecuaciones que aparecen a continuación. El valor relativo de la intensidad de campo por difracción E, con respecto a la intensidad de campo en el espacio libre, E_0 , se da por la ecuación (6).

$$20\log \frac{E}{E_0} = F(X) + G(Y_1) + G(Y_2)dB \quad (6)$$

Donde, X es la longitud normalizada del trayecto entre las antenas de alturas normalizadas Y_1 e Y_2 y se puede calcular con la ecuación (6), $F(X)$ corresponde al término de distancia y $G(Y)$ corresponde a la ganancia en función de la altura de las antenas, estas últimas se pueden calcular con las ecuaciones (7) a (13).

$$X = \beta \left(\frac{\pi}{\lambda a_e^2}\right)^{1/3} d \quad (7)$$

$$Y = 2\beta \left(\frac{\pi^2}{\lambda^2 a_e} \right)^{1/3} h \quad (8)$$

Donde, d: longitud del trayecto (km) y h: altura de la antena (m)

$$\beta = \frac{1+1,6K^2+0,67K^4}{1+4,5K^2+1,53K^4} \quad (9)$$

$$F(X) = 11 + \log(X) - 17,6X \text{ para } X \geq 1,6 \quad (10)$$

$$F(X) = -20\log(X) - 5,6488X^{1,425} \text{ para } X < 1,6 \quad (11)$$

$$G(Y) = 17,6(B - 1,1)^{1/2} - 5\log(B - 1,1) - 8 \text{ para } B > 2 \quad (12)$$

$$G(Y) = 20\log(B - 0,1B^3) \text{ para } B \leq 2 \quad (13)$$

Donde $B = \beta Y$ si $G(Y) < 2 + 20 \log K$, se fija $G(Y)$ al valor $2 + 20 \log K$.

Las funciones F (influencia de la distancia) y H (ganancia de altura) están representadas por los nomogramas que aparecen en las Figuras 3, 4, 5 y 6 de la Recomendación, que arrojan directamente el nivel recibido con relación al nivel del espacio libre, para $k = 1$ y $k = 4/3$, y frecuencias superiores a 30 MHz aproximadamente. El nivel recibido para otros valores de k debe calcularse utilizando la escala de frecuencias para $k = 1$, pero reemplazando la frecuencia en cuestión por una frecuencia hipotética igual a f/k^2 , para las Figuras 3 y 5, y a $f/k^{1/2}$, para las Figuras 4 y 6 de la recomendación.

- *Pérdidas de difracción para cualquier distancia a 10 MHz y frecuencias superiores.* Corresponde a un procedimiento a utilizar en un trayecto de Tierra esférica de cualquier longitud, en frecuencias de 10 MHz y superiores, para un radio efectivo de la Tierra $a_e > 0$. El método emplea el cálculo de Pérdidas por difracción en trayectos transhorizonte para largas distancias y para el resto de los casos se emplea un procedimiento de interpolación basado en un radio ficticio de la Tierra teórico. El procedimiento consiste en calcular la distancia de visibilidad directa marginal dada por la ecuación (14).

$$d_{los} = (2a_e)^{1/2} (h_1^{1/2} + h_2^{1/2}) \quad (14)$$

Si $d \geq d_{los}$ se calculan las pérdidas de difracción utilizando el método Pérdidas por difracción en trayectos transhorizonte y, no es necesario realizar más cálculos; en caso contrario, se calcula la altura libre de obstáculos más pequeña entre el trayecto de Tierra curva y el rayo entre las antenas, h y el trayecto libre de obstáculos requerido para unas pérdidas de difracción cero, h_{req} , como se observa en las ecuaciones (15) a (21).

$$h = \frac{\left(h_1 - \frac{d_1^2}{2a_e} \right) d_2 + \left(h_2 - \frac{d_2^2}{2a_e} \right) d_1}{d} \quad (15)$$

$$d_1 = \frac{d(1+b)}{2} \quad (16)$$

$$d_2 = d - d_1 \quad (17)$$

$$b = 2 \left(\frac{m+1}{3m} \right)^{1/2} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \left(\frac{3m}{(m+1)^3} \right)^{1/2} \right) \right\} \quad (18)$$

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \quad (19)$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \quad (20)$$

$$h_{req} = 0,552 \left(\frac{d_1 d_2 \lambda}{d} \right)^{1/2} \quad (21)$$

Si $h > h_{req}$ las pérdidas de difracción para el trayecto son cero y no se necesitan más cálculos; en caso contrario, se calcula el radio ficticio de la Tierra modificado, a_{em} , que proporciona la visibilidad directa marginal a la distancia d , tal como se ilustra en la ecuación (22).

$$a_{em} = 0,5 \left(\frac{d}{h_1^{1/2} + h_2^{1/2}} \right)^2 \quad (22)$$

Se calculan nuevamente las pérdidas por el método pérdidas por difracción en trayectos transhorizonte, utilizando el radio ficticio de la Tierra modificado a_{em} en vez del radio ficticio de la Tierra a_e , y a estas pérdidas se les denomina A_h . Si A_h es negativo, las pérdidas de difracción en el trayecto son cero y no son necesarios más cálculos; en caso contrario, se calculan las pérdidas de difracción interpoladas, mediante la ecuación (23).

$$A = \left[1 - \frac{h}{h_{req}}\right] A_h \quad (23)$$

2.1.8 Modelo de difracción sobre obstáculos aislados o sobre un trayecto terrenal general

La recomendación presenta cinco posibles casos de análisis: Obstáculo único en arista en filo de cuchillo, obstáculo único de forma redondeada, dos aristas aisladas, cilindros múltiples aislados, método para un trayecto terrenal general. A continuación, se presentan los tres primeros casos, entendiendo que los demás son consecuencia de la aplicación de los primeros en cascada.

- *Obstáculo único en arista en filo de cuchillo.* En este caso todos los parámetros geométricos se agrupan en un solo parámetro, designado por v y que se puede calcular alguna de las ecuaciones desde la (24) a (28).

$$v = h \left(\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \right)^{1/2} \quad (24)$$

$$v = \theta \left(\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \right)^{1/2} \quad (25)$$

$$v = \left(\frac{2h\theta}{\lambda} \right)^{1/2} \quad (26)$$

$$v = \left(\frac{2d}{\lambda} \alpha_1 \alpha_2 \right)^{1/2} \quad (27)$$

Donde, h : altura de la cima del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto. Si la cima queda por debajo de esa línea, h es negativa, d_1 y d_2 : distancias desde los dos extremos del trayecto a la cima del obstáculo, d : longitud del trayecto, θ : ángulo de difracción (rad); tiene el mismo signo que h . Se supone que el ángulo θ es inferior a unos 0,2 rad, o sea, aproximadamente 12°, α_1 y α_2 : ángulos en radianes bajo los que, a partir de un extremo, se ven la cima del obstáculo y el extremo opuesto; tienen el mismo signo que h en las ecuaciones anteriores (Figura 2).

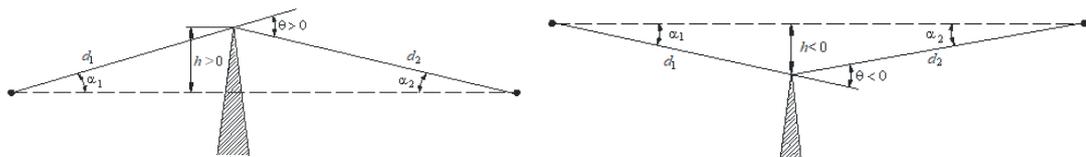


Figura 2. Elementos geográficos

Las pérdidas vienen dadas por la ecuación (28).

$$J(v) = -20 \log \left(\frac{([1-C(v)-S(v)]^2 + [C(v)-S(v)]^2)^{1/2}}{2} \right) \quad (28)$$

Donde $C(v)$ y $S(v)$ son las partes real e imaginaria respectivamente de la integral compleja de Fresnel $F(v)$

- *Obstáculo único de forma redondeada.* La pérdida por difracción puede calcularse con la ecuación (29).

$$A = J(v) + T(m, n) \quad (29)$$

Donde $T(m, n)$ es la atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo y tiene relación con las ecuaciones (30) a (33).

$$T(m, n) = 7,2m^{1/2} - (2 - 12,5n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{para } mn \leq 4 \quad (30)$$

$$T(m, n) = -6 - 20 \log(mn) + 7,2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{para } mn > 4 \quad (31)$$

$$m = R \frac{\left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right]}{\left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3}} \quad (32)$$

$$n = \frac{h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3}}{R} \quad (33)$$

El radio de curvatura del obstáculo corresponde al radio de curvatura del vértice de una parábola ajustada con respecto al perfil del obstáculo cerca de la parte superior.

- *Dos aristas aisladas.* En este caso, la pérdida por difracción se calcula aplicando sucesivamente el método de difracción en arista de filo de cuchillo o el método de difracción en formas redondeadas a los dos obstáculos; la parte superior del primer obstáculo actúa como fuente de difracción sobre el segundo. La pérdida por difracción total se calcula a partir de la ecuación (34).

$$L = L_1 + L_2 + L_c \quad (34)$$

L_c corresponde a un término de corrección por la separación entre aristas (Figura 3) calculado con ecuación (35).

$$L_c = 10 \log \left[\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right] \quad (35)$$

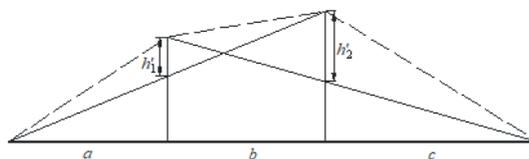


Figura 3. Método para dos aristas aisladas

2.2 Deygout

Este método es una modificación realizada por los desarrolladores de Xirio online al modelo propuesto por Deygout en el artículo llamado *Multiple knife-edge diffraction of microwaves* [4]. Y la forma en que lo usan es la siguiente. Se usa este modelo si se asume que los obstáculos son de tipo *filo de cuchillo* y por lo tanto se calculan las pérdidas por difracción usando un algoritmo recursivo. La herramienta Xirio online lo primero que hace es identificar el obstáculo del trayecto que tenga una variable de difracción (V_p) mayor. Se calculan las pérdidas por difracción (J) debido al obstáculo identificado para el trayecto que se esté analizando.

Si el obstáculo genera un $J(V_p)$ mayor a cero, es decir que bloquee el enlace, entonces se definen dos sub-trayectos entre los dos extremos del trayecto que se esté analizando y el obstáculo. Y para cada uno de ellos se hace lo mismo que se hizo al comienzo, siendo así un proceso recursivo. Es decir que para cada uno de ellos se identifica el obstáculo con mayor variable de difracción, con variables de difracción V_t y V_r y se procede a calcular las pérdidas por difracción que produce cada uno de estos, llamadas $J(V_p)$ y $J(V_r)$.

Si alguno de estos dos obstáculos genera un $J(V_p)$ o $J(V_r)$ mayor a cero, estaría bloqueando el rayo en el sub-trayecto y se debería otra vez generar dos sub-trayectos por cada obstáculo que bloquee el sub-trayecto. Como se dijo anteriormente este proceso se continúa haciendo de forma recursiva hasta el momento en que no existan obstáculos que bloquee el rayo. Si existen obstáculos que intercepten la primera zona de Fresnel, dentro del mismo sub-trayecto, pero sin bloquear el enlace, se suman entre sí. Aun así, cabe mencionar lo que el método original decía. Respecto la Figura 4, el autor asume lo que se observa en la ecuación (36) respecto a la altura [5].

$$\alpha \ll h < \frac{d_1}{10} \text{ o } \frac{d_2}{10} \quad (36)$$

Y sugiere revisar que las primeras zonas de Fresnel construidas alrededor de SM y MR no estén obstruidas, ya que esto es un buen criterio para caracterizar un caso típico de trayecto con obstáculo borde de cuchillo.

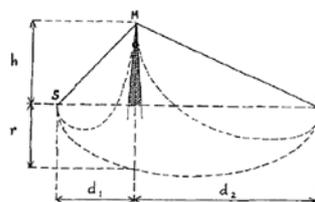


Figura 4. Distancias y zonas de Fresnel

En una frecuencia f en MHz y entre dos antenas isotrópicas separadas por d kilómetros, la pérdida de espacio libre en decibels se calcula con la ecuación (37).

$$a_0 = 32,5 + 20\log_{10}f + 20\log_{10}d \quad (37)$$

La pérdida por difracción (a_m) en decibels se puede expresar como función de h/r , r es el radio de la primera zona de Fresnel construida alrededor de SR. Con distancias en Km y f en MHz, r se halla en metros con la ecuación (38).

$$r = 548 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f(d_1 + d_2)}} \quad (38)$$

Para $h > r$ se tiene $a_m = 20\log_{10}(h/r) + 16$. Pero para simplificar la escritura del residuo se usará la notación de la ecuación (39).

$$a_m = f(d_1, d_2, h) \text{ y } a = a_0 + a_m \quad (39)$$

Para la solución B de la Figura 5, se puede escribir que a_{mB} es función de d_1, d_2 y h . Y para la solución C, lo planteado en las ecuaciones (40) y (41).

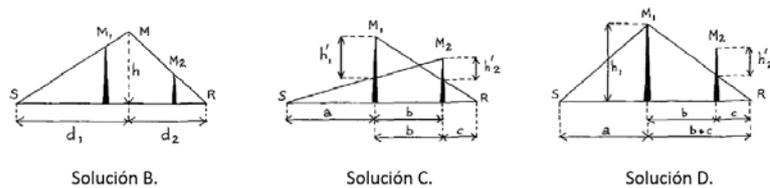


Figura 5. Soluciones analizadas

$$a_{mC} = a_{m1}' + a_{m2}' \quad (40)$$

$$a_{m1}' = f(d_1 = a, d_2 = b, h = h_1') \text{ y } a_{m2}' = f(d_1 = b, d_2 = c, h = h_2') \quad (41)$$

2.3 Recomendación UIT-R P.452

En esta Recomendación se describe un método de predicción para evaluar la interferencia entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra a frecuencias desde unos 0,1 GHz a 50 GHz, teniendo en cuenta los mecanismos de interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros y en cielo despejado [6]. El método menciona el efecto de diferentes mecanismos de propagación, teniendo en cuenta diferentes rangos de aplicación en lo relacionado a distancia o probabilidad y se describirá más adelante. Este modelo se usa solo para frecuencias menores a 50 GHz, distancias menores de 10000 Km y dispersión troposférica menor a 50%.

La propagación de la interferencia se puede producir por medio de distintos mecanismos y la importancia de la influencia de ellos depende de variables como el clima, distancia, porcentaje de tiempo de ellos y la topografía del trayecto. En cualquier instante de tiempo pueden ocurrir uno o más mecanismos. En la recomendación UIT-R P.452 [7] los principales mecanismos de propagación de la interferencia considerados se analizan a continuación:

- **Visibilidad directa:** El mecanismo más directo de propagación de la interferencia es aquel en el que existe un trayecto de visibilidad mutua en condiciones atmosféricas de equilibrio, como se observa en la Figura 6. Sin embargo, puede surgir un problema adicional cuando la difracción del sub-trayecto produce un ligero aumento del nivel de la señal por encima del nivel esperado. Además, en todos los trayectos, excepto en los más cortos (es decir, trayectos mayores de unos 5 km), los niveles de la señal pueden a menudo aumentar significativamente durante periodos cortos de tiempo debido a los efectos de propagación multitrayecto y de enfoque resultantes de la estratificación atmosférica.

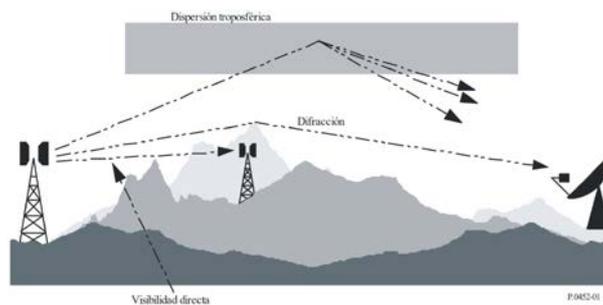


Figura 6. Mecanismos de propagación de la interferencia a largo plazo

- **Difracción:** Fuera del escenario de visibilidad directa y bajo condiciones normales, los efectos de difracción suelen ser dominantes cuando aparecen niveles significativos de la señal. Para los servicios en los que los problemas de anomalías de corta duración no son importantes, la exactitud del modelo de difracción determina a menudo la densidad de los sistemas que pueden implantarse. La capacidad de predicción de la difracción debe ser tal que permita incluir las situaciones de terreno poco ondulado, de obstáculos discretos y de terreno irregular (no estructurado) (Figura 6).
- **Dispersión (Scattering) troposférica:** Este mecanismo define el nivel de interferencia de fondo para trayectos más largos (por ejemplo, 100 a 150 km) en los que el campo de difracción se hace muy débil. No obstante, con excepción de algunos pocos casos especiales en los que intervienen estaciones terrenales sensibles o fuentes de interferencia de muy alta potencia (por ejemplo, sistemas radar), la interferencia a través del mecanismo de scattering troposférico tendrá un nivel demasiado reducido como para ser considerado significativo.
- **Propagación por conductos de superficie:** Este mecanismo de propagación de corta duración podría cursar interferencia sobre el agua y en playas planas, y puede generar niveles de señal elevados en distancias mayores a 500 km sobre el mar. Estas señales pueden exceder el nivel equivalente de espacio libre en ciertas condiciones.
- **Reflexión y refracción en capas elevadas:** esta reviste gran importancia ya que tener en cuenta estos fenómenos puede hacer que las señales superen las pérdidas debidas a la difracción que causa el terreno en situaciones favorables de geometría del trayecto, como se observa en la Figura 7. Hay que tener en cuenta que puede ser significativa hasta distancias de 300 km.

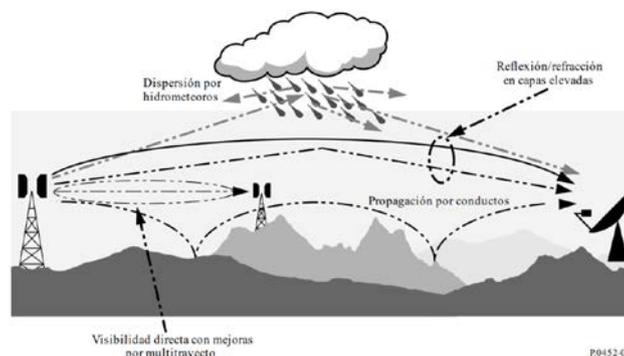


Figura 7. Mecanismos de propagación anómala de la interferencia (corta duración)

- **Dispersión por hidrometeoros:** puede ser una fuente de interferencia entre los transmisores y estaciones terrenales debido a que puede actuar de forma omnidireccional, por lo tanto, la dispersión puede tener una repercusión más allá del tramo de interferencia. Sin embargo, los valores de interferencia son bajos y por lo tanto usualmente no representan un problema significativo.

Un problema fundamental relacionado a la predicción de interferencia es la dificultad que representa establecer un grupo de métodos prácticos relacionados con un rango amplio de distancias y porcentajes de tiempo, es decir; para la atmósfera real en la que un fenómeno predominante es mezclado paulatinamente con otro a medida que cambian las condiciones meteorológicas o del trayecto. Especialmente en estos trayectos cambiantes, se puede producir una señal con una energía determinada durante un tiempo determinado que se deba a la suma de los distintos fenómenos. El método relacionado al cielo despejado implica usar modelos distintos para la difracción, la reflexión en capas/por conductos, y la dispersión troposférica. Estos modelos se aplican en cada caso, sin importar si el trayecto tiene visibilidad directa o transhorizonte. A continuación, se deben mezclar los resultados usando una técnica de fusión.

2.4 Recomendación UIT-R P.530-17

La recomendación P.530 [8] permite considerar los posibles fenómenos no deseables que pueden ocurrir en el trayecto de un radio enlace, proporcionando una serie de modelos que permiten evaluar los efectos de propagación en sistemas de radiocomunicaciones. Xirio online bajo la recomendación UIT-R P.530-17 proporciona métodos de predicción para los efectos de propagación que deben tenerse en cuenta en el diseño de enlaces fijos digitales con visibilidad directa, tanto en condiciones de cielo despejado como con lluvia. También se proporcionan orientaciones para el diseño de enlaces mediante procedimientos paso a paso bien definidos, que incluyen la utilización de técnicas de mitigación con objeto de minimizar las degradaciones de propagación. La probabilidad de interrupción calculada como resultado final en este documento es la base para otras recomendaciones de la UIT, las cuales tratan aspectos sobre características de error y disponibilidad.

En la recomendación UIT-R P.530-17 para el diseño de los sistemas relevadores radioeléctricos con visibilidad directa deben considerar varios efectos vinculados con la propagación, estos se tratan a continuación.

2.5 Pérdida de propagación

La pérdida de propagación, para un trayecto terrenal con visibilidad directa, respecto a las pérdidas en el espacio libre (UIT-R P.526) es la suma de las contribuciones y cada una de ellas tiene sus características propias en función de la frecuencia, la longitud del trayecto y la ubicación geográfica:

- *Atenuación debida a los gases atmosféricos:* Para frecuencias mayores a 10 GHz siempre está presente una atenuación debida a la absorción del oxígeno y vapor de agua, por lo que debe incluirse en el cálculo de la pérdida total de propagación. La atenuación a lo largo de un trayecto de longitud d (km) viene dada por la ecuación (42).

$$A_a = \gamma_a d \text{ dB} \quad (42)$$

La atenuación específica γ_a (dB/km) se obtiene de la Recomendación UIT-R P.676

- *Desvanecimiento por difracción:* Las variaciones de las condiciones de refracción de la atmósfera pueden modificar el radio efectivo de la Tierra, es decir el factor k , con respecto a su valor mediano que es aproximadamente de 4/3 para una atmósfera normal (véase la Recomendación UIT-R P.310). Las estadísticas del factor k para un punto pueden determinarse a partir de medidas o predicciones del gradiente del índice de refracción en los primeros 100 m de la atmósfera (UIT R P.453 sobre los efectos de la refracción). Estos gradientes deben promediarse para obtener el valor efectivo de k correspondiente a la longitud del trayecto en cuestión, k_e . Los valores de k_e que se exceden durante el 99,9% del tiempo se pueden determinar en función de los criterios de trayecto despejado que son: pérdida por difracción en función del despejamiento del trayecto y criterios de planificación para el despejamiento del trayecto.
- *Desvanecimientos y refuerzos debidos a la propagación por trayectos múltiples y mecanismos conexos:* Para el análisis de enlaces de unos pocos kilómetros de longitud deben tenerse en cuenta diversos mecanismos de desvanecimiento en condiciones de cielo despejado originados en las capas extremadamente refractivas de la atmósfera. Cuando la dispersión del haz de la señal directa se combina con una señal reflejada en una superficie dando lugar a desvanecimiento por trayectos múltiples se produce un tipo de desvanecimientos selectivos en frecuencia especialmente acusados. Los desvanecimientos causados por centelleo debido a irregularidades de pequeña magnitud producidas por turbulencias atmosféricas siempre están presentes con estos mecanismos, pero a frecuencias inferiores a unos 40 GHz su efecto sobre la distribución de desvanecimiento global no es significativo, los métodos utilizados para determinar el Desvanecimientos son: método para porcentajes de tiempo pequeños, método para todos los porcentajes de tiempo y método de predicción de los refuerzos.
- *Atenuación debida a hidrometeoros:* La lluvia puede causar desvanecimientos profundos, particularmente a frecuencias más altas. La Rec. 530 incluye un procedimiento simple, descrito a continuación, que puede ser usado para estimar las estadísticas a largo plazo de la atenuación debida a lluvia:

Paso 1: Obtener la intensidad de precipitación $R_{0.01}$ superada durante el 0.01% del tiempo (con un tiempo de integración de 1 min).

Paso 2: Calcular la atenuación específica, γR (dB/km) para la frecuencia, polarización, e intensidad de lluvia de interés usando la Rec. UIT-R P.838.

Paso 3: Calcular la longitud efectiva del trayecto, d_{eff} , del enlace, multiplicando la longitud del trayecto real d por un factor de distancia r . Una estimación de este factor viene dada por las ecuaciones (43) y (44).

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (43)$$

$$d_0 = 35e^{-0.15R_{0.01}} \quad (44)$$

Para $R_{0.01} \leq 100 \text{ mm/h}$ y para $R_{0.01} > 100 \text{ mm/h}$, se usa el valor 100 mm/h en lugar de $R_{0.01}$.

Paso 4: Una estimación de la atenuación del trayecto excedida durante el 0,01% del tiempo viene dada por la ecuación (45).

$$A_{0.01} = \gamma R d_{eff} = \gamma R d r \quad (45)$$

Paso 5: Para radioenlaces situados a 30° o más (Norte o Sur) de latitud, las atenuaciones excedidas durante porcentajes de tiempo p entre 0,001% y 1% pueden deducirse de la ecuación (46).

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0.12p^{-(0.546 + 0.043 \log_{10} p)} \quad (46)$$

Paso 6: Para radioenlaces situados por debajo de 30° (Norte o Sur) de latitud, las atenuaciones excedidas durante otros porcentajes de tiempo p en el margen de 0,001% a 1% pueden deducirse de la ecuación (47).

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0.12p^{-(0.855+0.139 \log_{10} p)} \quad (47)$$

Variación de los ángulos de llegada y de salida: Valores anormales del índice de refracción pueden provocar variaciones considerables de los ángulos de salida y de llegada de las ondas transmitidas y recibidas, respectivamente. El efecto puede ser importante en trayectos largos en los que se emplean antenas de elevada ganancia y haz estrecho. Si las anchuras de haz de las antenas son muy pequeñas, la onda directa de salida/llegada puede estar tan descentrada del eje del haz que dé lugar a un desvanecimiento importante. Por otra parte, si las antenas se han alineado durante periodos de ángulos de llegada muy anormales, la alineación puede no ser óptima.

- *Reducción de la discriminación por polarización cruzada (XPD):* La discriminación por polarización cruzada (XPD) puede deteriorarse suficientemente como para causar interferencia cocanal y, en menor medida, interferencia de canal adyacente. Debe tenerse en cuenta la reducción de la XPD producida en condiciones de cielo despejado y de precipitaciones.
- *Distorsión debida a los efectos de la propagación:* La distorsión en los enlaces con visibilidad directa en las bandas de ondas decimétricas y centimétricas está causada principalmente por el hecho de que tanto la amplitud como el retardo de grupo, en condiciones de propagación por trayectos múltiples y cielo despejado, dependen de la frecuencia.

Se puede observar que en los sistemas analógicos un aumento del margen contra desvanecimientos mejorará la calidad de funcionamiento, ya que se reducen los efectos del ruido térmico. Mientras que en los sistemas digitales la utilización de un margen contra desvanecimientos mayor no será un factor de ayuda, si es el desvanecimiento selectivo en frecuencia el que ocasiona la reducción en la calidad de funcionamiento.

Para el análisis en la mayoría de las veces se supone que la señal sigue diferentes trayectos o rayos del transmisor al receptor. Esto presupone que el trayecto directo atraviesa la atmósfera y puede incluir uno o más trayectos reflejados por la superficie y/o refractados por la atmósfera adicionales. Si la señal directa y una réplica de ésta de aproximadamente la misma amplitud, pero retardada apreciablemente, llegan al receptor, se producirá una interferencia entre símbolos que puede redundar en un error al detectar la información. Para evitar estos inconvenientes se utiliza un modelo multirrayos que tiene en cuentas diferentes variables como son el retardo (diferencia temporal entre el rayo que llega primero y los demás) y las distribuciones de amplitud, junto con un modelo adecuado de los elementos del equipo, tales como moduladores, ecualizador, dispositivos de corrección de errores en recepción sin canal de retorno (FEC), etc.

La probabilidad de interrupción de la transmisión se define aquí como la probabilidad de que la BER sobrepase un determinado valor umbral. El método de cálculo se describe a continuación.

Paso 1: Calcular el retardo temporal medio, teniendo en cuenta que d es la longitud del trayecto en Km, a partir de la ecuación (48).

$$\tau = 0.7 \frac{d}{50} 1.3 \quad (48)$$

Paso 2: Calcular el parámetro de actividad del multirayecto η con la ecuación (49).

$$\eta = 1 - e^{-0.2(P_0)^{0.75}} \quad (49)$$

Paso 3: Calcular la probabilidad de interrupción selectiva de la transmisión con la ecuación (50).

$$P_S = 2.15\eta \left(W_M \times 10^{\frac{-B_M}{20}} \frac{\tau^2 m}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \times 10^{\frac{-B_{NM}}{20}} \frac{\tau^2 m}{|\tau_{r,NM}|} \right) \quad (50)$$

Donde W_x : anchura de la signatura (GHz), B_x : profundidad de la signatura (dB) y $t_{r,x}$: retardo de referencia (ns) utilizado para obtener la signatura, mientras que x indica ya sea el desvanecimiento de fase mínima (M) o el de fase no mínima (NM). Si únicamente se dispone del parámetro de sistema K_n normalizado, puede calcularse la probabilidad de interrupción selectiva con la ecuación (51).

$$P_S = 2.15\eta (K_{n,m} + K_{n,NM}) \quad (51)$$

Donde T es el periodo de símbolos del sistema (ns) y $K_{n,x}$ el parámetro del sistema normalizado, siendo x el desvanecimiento de fase mínima (M) o el de fase no mínima (NM).

Técnicas para reducir los efectos de la propagación por trayectos múltiples: En el diseño del enlace se deben tener en cuenta los efectos de los desvanecimientos relativamente lentos no selectivos en frecuencia (es decir, el desvanecimiento plano) debidos a la dispersión del haz, así como los desvanecimientos más rápidos selectivos en frecuencia causados por la propagación en trayectos múltiples. Se consideran dos técnicas que permiten reducir esos efectos y se pueden dividir en dos, la primera que no requieren ninguna clase de recepción o transmisión en diversidad, y la segunda técnica que requieren diversidad.

- *Predicción de la interrupción total de la transmisión:* Calcúlese la probabilidad total de interrupción de la transmisión debida a los efectos de propagación en condiciones de cielo despejado mediante la ecuación (52).

$$P_t = \left\{ \begin{array}{l} P_{ns} + P_s + P_{XP} \\ P_d + P_{XP} \text{ si se utiliza diversidad} \end{array} \right\} \quad (52)$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para comparar las diferentes recomendaciones de la UIT y los métodos que emplea Xirio online, se realizaron tres enlaces, todos tomando como punto de partida o extremo 1, la sede Tagaste de la Universitaria Agustiniiana. Para cada enlace se mantuvieron los mismos parámetros del transmisor y del receptor y, solo se cambió el método de cálculo. El enlace 1, corresponde a Uniagustiniana Tagaste - Biblioteca El Tintal; el enlace 2, atañe a Uniagustiniana Tagaste – Colegio Aguastiniano Salitre y el enlace 3, concierne a Uniagustiniana Tagaste – Colegio Aguastiniano Norte. La ubicación de estos puntos y la visibilidad del enlace se puede observar en la Figura 8.



Figura 8. Ubicación del transmisor y receptor para cada enlace analizado

En la Tabla 1 se presenta el Informe del vano digital para el enlace 1 (Uniagustiniana Tagaste – Biblioteca El Tintal).

Tabla 1. Vano digital del enlace Uniagustiniana Tagaste – Biblioteca El Tintal

Resumen de cumplimiento de calidad e indisponibilidad						
Radiocanal	Trayecto	Despejamiento	Modulación	Calidad	Indisponibilidad	Margen desv.
24500 MHz / H	Directo	Sí	QAM	Sí	Sí	59.44
26500 MHz / H	Inverso	Sí	QAM	Sí	Sí	59.44
Resultado vano digital: Enlace Uniagustiniana Tagaste-Biblioteca Tintal						
Datos del extremo			Extremo 1	Extremo 2		
	Nombre	Uniagustiniana Tagaste		Biblioteca Tintal		
	Longitud	74° 8' 41.39" W		74° 9' 16.34" W		
	Latitud	4° 39' 11.97" N		4° 38' 33.7" N		
	Cota	m	2543.26	2545.01		
	Acimut	°	222.5	42.5		
	Inclinación	°	0.12	-0.12		
	Frecuencia	MHz	24500 / H	26500 / H		
	Ganancia máxima de antena	dBi	35.5	35.5		
	Altura de antena	m	15 (Nivel de azotea)	10 (Nivel de azotea)		
	Pérdidas del feeder	dB	0.5	0.5		
Longitud del feeder	m	20	20			
Longitud del trayecto	km	1.59				
Acimut	°	222.5	42.5			
Inclinación	°	0.12	-0.12			
Dato	Menor despejamiento	m	11.56 (564.19 %)			
	Longitud		74° 9' 5.42" W			

	Latitud		4° 38' 45.66" N	
	Rugosidad del terreno, s _a	m	870.47	
	Gradiente de refractividad puntual, dN ₁	N/km	-108.03	
	Factor geoclimático, K		3.444·10 ⁻⁶	
	Factor de ocurrencia de multitrayecto, p ₀	%	7.917·10 ⁻⁷	7.917·10 ⁻⁷
	Intensidad de lluvia para el 0.01%, R _{0.01%}	mm/h	25	
Modulación	Modulación		QAM-16	
	Velocidad binaria	Mbps	34	
	Potencia de equipo	W	0.5	
	Potencia de transmisión	dBm	26.99	26.99
	Umbral de recepción BER _{SES}	dBm	-87	
Balance de enlace			Extremo 1 - Extremo 2	Extremo 2 - Extremo 1
	PIRE en acimut	dBm	61.99	61.99
	Atenuación espacio libre	dB	124.29	124.29
	Atenuación por difracción	dB	0	0
	Atenuación por gases	dB	0.26	0.26
	Atenuación por lluvia	dB	0	0
	Potencia disponible en recepción	dBm	-27.56	-27.56
	Margen bruto para cielo claro	dB	59.44	59.44
Resultados de calidad			Extremo 1 - Extremo 2	Extremo 2 - Extremo 1
	Probabilidad de desvanecimiento plano	%	0.0	0.0
	Probabilidad de desvanecimiento selectivo	%	0.0	0.0
	Probabilidad de desvanecimiento XPD	%	0.0	0.0
	SESR	%	0.0	0.0
	Objetivo SESR	%	0.015	0.015
	SES	seg/mes	1	1
	Objetivo SES	seg/mes	389	389
Resultados de indisponibilidad			Extremo 1 - Extremo 2	Extremo 2 - Extremo 1
	Indisponibilidad lluvia	%	<0.001*	<0.001*
	Indisponibilidad total	%	2.113·10 ^{-5*}	2.113·10 ^{-5*}
	Objetivo indisponibilidad	%	0.04	0.04
	Indisponibilidad total	min/año	1	1
	Objetivo indisponibilidad	min/año	208	208

En la Figura 9 se ilustra el perfil del terreno y el comportamiento del enlace 1, de acuerdo con los métodos y Recomendaciones analizados.

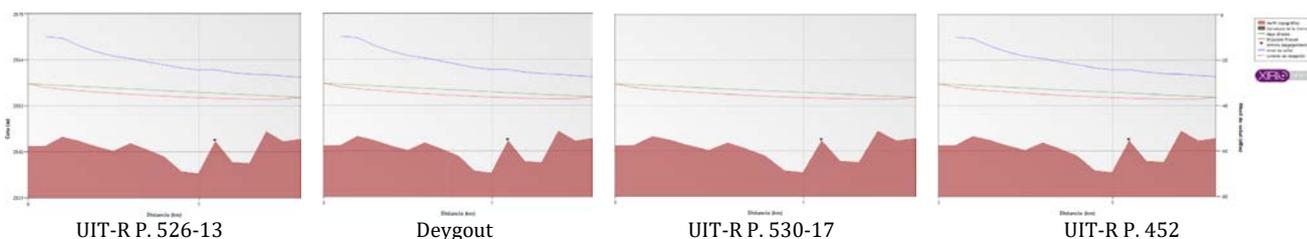


Figura 9. Perfil del terreno y comportamiento del enlace 1

En la Tabla 2 se presenta el informe del vano digital para el enlace 2.

Tabla 2. Vano digital del enlace Uniagustiniana Tagaste – Colegio Agustiniano Salitre

Resumen de cumplimiento de calidad e indisponibilidad						
Radiocanal	Trayecto	Despejamiento	Modulación	Calidad	Indisponibilidad	Margen dev.
24500 MHz / H	Directo	Sí	QAM	Sí	Sí	53.01
26500 MHz / H	Inverso	Sí	QAM	Sí	Sí	53.01
Resultado vano digital: Enlace Uniagustiniana Tagaste-Colegio Agustiniano Salitre						
Datos del			Extremo 1	Extremo 2		
	Nombre		Uniagustiniana Tagaste	Colegio Agustiniano Salitre		
	Longitud		74° 8' 41.39" W	74° 6' 56.55" W		
	Latitud		4° 39' 11.97" N	4° 39' 19.72" N		
	Cota	m	2543.26	2550.05		
	Acimut	°	85.79	265.79		
Inclinación	°	-0.03	0.03			

	Frecuencia	MHz	24500 / H	26500 / H
	Ganancia máxima de antena	dBi	35.5	35.5
	Altura de antena	m	15 (Nivel de azotea)	10 (Nivel de azotea)
	Pérdidas del feeder	dB	0.5	0.5
	Longitud del feeder	m	20	20
	Longitud del trayecto	km	3.24	
	Acimut	°	85.79	265.79
Datos del trayecto	Inclinación	°	-0.03	0.03
	Menor despejamiento	m	10.62 (338.5 %)	
	Longitud		74° 7' 44.2" W	
	Latitud		4° 39' 16.2" N	
	Rugosidad del terreno, s_a	m	858.28	
	Gradiente de refractividad puntual, dN_1	N/km	-108.23	
	Factor geoclimático, K		$3.471 \cdot 10^{-6}$	
	Factor de ocurrencia de multitrayecto, p_0	%	$1.764 \cdot 10^{-5}$	$1.764 \cdot 10^{-5}$
	Intensidad de lluvia para el 0.01%, $R_{0.01\%}$	mm/h	25	
	Modulación	Modulación		QAM-16
Velocidad binaria		Mbps	34	
Potencia de equipo		W	0.5	
Potencia de transmisión		dBm	26.99	26.99
Umbral de recepción BER_{SES}		dBm	-87	
Balance de enlace			Extremo 1 - Extremo 2	Extremo 2 - Extremo 1
	PIRE en acimut	dBm	61.99	61.99
	Atenuación espacio libre	dB	130.44	130.44
	Atenuación por difracción	dB	0	0
	Atenuación por gases	dB	0.53	0.53
	Atenuación por lluvia	dB	0	0
	Potencia disponible en recepción	dBm	-33.99	-33.99
	Margen bruto para cielo claro	dB	53.01	53.01
Resultados de calidad			Extremo 1 - Extremo 2	Extremo 2 - Extremo 1
	Probabilidad de desvanecimiento plano	%	0.0	0.0
	Probabilidad de desvanecimiento selectivo	%	0.0	0.0
	Probabilidad de desvanecimiento XPD	%	0.0	0.0
	SESR	%	0.0	0.0
	Objetivo SESR	%	0.015	0.015
	SES	seg/mes	1	1
	Objetivo SES	seg/mes	389	389
Resultados de indisponibilidad			Extremo 1 - Extremo 2	Extremo 2 - Extremo 1
	Indisponibilidad lluvia	%	<0.001*	<0.001*
	Indisponibilidad total	%	$2.113 \cdot 10^{-5}$ *	$2.113 \cdot 10^{-5}$ *
	Objetivo indisponibilidad	%	0.04	0.04
	Indisponibilidad total	min/año	1	1
	Objetivo indisponibilidad	min/año	208	208

En la Figura 10 se ilustra el perfil del terreno y el comportamiento del enlace 2.

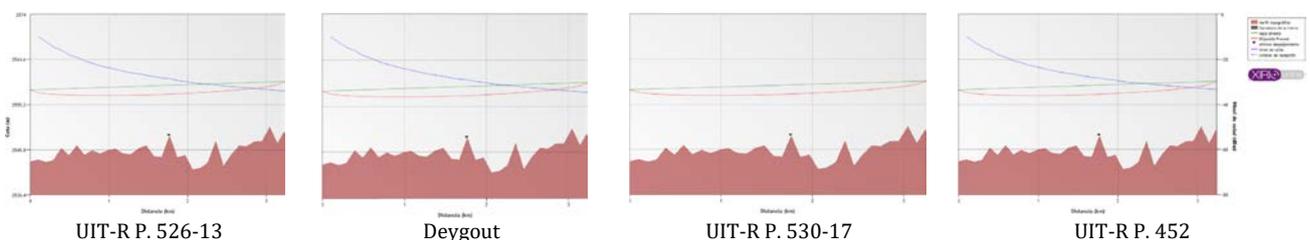


Figura 10. Perfil del terreno y comportamiento del enlace 2

En la Tabla 3 se presenta el Informe del vano digital del enlace 3 (Uniagustiniana Tagaste – Colegio Agustiniiano Norte).

Tabla 3. Vano digital del enlace Uniagustiniana Tagaste – Colegio Agustiniiano Norte

Resumen de cumplimiento de calidad e indisponibilidad						
Radiocanal	Trayecto	Despejamiento	Modulación	Calidad	Indisponibilidad	Margen desv.
24500 MHz / H	Directo	No	QAM	Sí	Sí	30.7
26500 MHz / H	Inverso	No	QAM	Sí	Sí	30.2

Resultado vano digital: Enlace Uniagustiniana Tagaste-Colegio Agustiniano Norte				
		Extremo 1	Extremo 2	
Datos del extremo	Nombre	Uniagustiniana Tagaste	Colegio Agustiniano Norte	
	Longitud	74° 8' 41.39" W	74° 4' 17" W	
	Latitud	4° 39' 11.97" N	4° 42' 2" N	
	Cota	m 2543.26	2547.71	
	Acimut	° 57.34	237.34	
	Inclinación	° 0	0	
	Frecuencia	MHz 24500 / H	26500 / H	
	Ganancia máxima de antena	dBi 35.5	35.5	
	Altura de antena	m 15 (Nivel de azotea)	10 (Nivel de azotea)	
	Pérdidas del feeder	dB 0.5	0.5	
Datos del trayecto	Longitud del feeder	m 20	20	
	Longitud del trayecto	km 9.68		
	Acimut	° 57.34	237.34	
	Inclinación	° 0	0	
	Menor despejamiento	m -2.66 (-48.89 %)¹		
	Longitud	74° 6' 27.84" W		
	Latitud	4° 40' 37.86" N		
	Rugosidad del terreno, s_a	m 840.42		
	Gradiente de refractividad puntual, dN_1	N/km -108.7		
	Factor geoclimático, K	$3.514 \cdot 10^{-6}$		
Modulación	Factor de ocurrencia de multitrayecto, p_0	% 0.0011	0.00117	
	Intensidad de lluvia para el 0.01%, $R_{0.01\%}$	mm/h 25		
	Modulación	QAM-16		
	Velocidad binaria	Mbps 34		
	Potencia de equipo	W 0.5		
	Potencia de transmisión	dBm 26.99	26.99	
	Umbral de recepción BER_{SES}	dBm -87		
	PIRE en acimut	dBm 61.96	61.96	
	Balance de	Atenuación espacio libre	dB 139.95	140.63
		Atenuación por difracción	dB 11.69	11.9
Atenuación por gases		dB 1.6	1.21	
Atenuación por lluvia		dB 0	0	
Potencia disponible en recepción		dBm -56.3	-56.8	
Margen bruto para cielo claro		dB 30.7	30.2	
Resultados de calidad		Extremo 1 - Extremo 2	Extremo 2 - Extremo 1	
Probabilidad de desvanecimiento plano	% $9.351 \cdot 10^{-7}$	$1.115 \cdot 10^{-6}$		
Probabilidad de desvanecimiento selectivo	% 0.0	0.0		
Probabilidad de desvanecimiento XPD	% 0.0	0.0		
SESR	% $9.351 \cdot 10^{-7}$	$1.115 \cdot 10^{-6}$		
Objetivo SESR	% 0.015	0.015		
SES	seg/mes 1	1		
Objetivo SES	seg/mes 389	389		
Resultados de indisponibilidad		Extremo 1 - Extremo 2	Extremo 2 - Extremo 1	
Indisponibilidad lluvia	% 0.00627	0.00928		
Indisponibilidad total	% 0.00627	0.00928		
Objetivo indisponibilidad	% 0.04	0.04		
Indisponibilidad total	min/año 33	49		
Objetivo indisponibilidad	min/año 208	208		

En la Figura 11 se ilustra el perfil del terreno y el comportamiento del enlace 3.

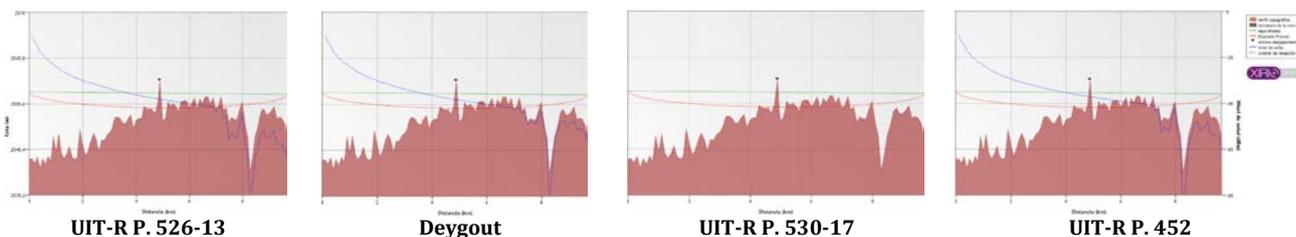


Figura 11. Perfil del terreno y comportamiento del enlace 3

Los datos obtenidos en cada simulación se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados simulaciones

Enlace	Longitud del trayecto (km)	Recomendación o método	Señal en extremo 2 Ida (dBm)	Señal en extremo 1 Regreso (dBm)
Uniagustiniana Tagaste – Biblioteca El Tintal	1,59	UIT-R P.526-13	-27,56	-27,56
		Deygout	-27,56	-27,56
		UIT-R P.452	-27,22	-27,22
		UIT-R P.530-17	-27,30	-27,30
Uniagustiniana Tagaste – Colegio Agustiniano Salitre	3,24	UIT-R P.526-13	-33,99	-33,99
		Deygout	-33,99	-33,99
		UIT-R P.452	-33,35	-33,35
		UIT-R P.530-17	-33,46	-33,46
Uniagustiniana Tagaste – Colegio Agustiniano Norte	9,68	UIT-R P.526-13	-65,07	-65,61
		Deygout	-56,30	-56,80
		UIT-R P.452	-59,26	-59,34
		UIT-R P.530-17	-54,71	-55,59

Los resultados de las simulaciones permiten observar comportamientos similares para trayectos no superiores a 3,24 km, independientemente de la Recomendación del UIT-R aplicada o el método empleado. En el caso del enlace Uniagustiniana Tagaste – Colegio Agustiniano Norte, con un trayecto de 9,68 km, se observa que el nivel de señal recibido dependerá de la Recomendación del UIT-R aplicada o el método empleado; en este orden de ideas, no se puede establecer con exactitud el nivel de señal verdadero mediante la simulación, por lo cual será necesario realizar mediciones en campo; adicionalmente, se aprecian niveles de señal diferentes para el trayecto de ida y para el trayecto de regreso, lo cual permite inferir un análisis mucho más riguroso por parte del software cuando la longitud del trayecto es considerable, tal como lo establecen las Recomendaciones del UIT-R.

Con respecto a los datos obtenidos, se puede observar que para el enlace Uniagustiniana Tagaste – Biblioteca El Tintal, con una longitud de 1,59 km, se presenta una desviación estándar de 0,18 tanto para el trayecto de ida como para el de regreso; para el enlace Uniagustiniana Tagaste – Colegio Agustiniano Salitre, con una longitud de 3,24 km, se presenta una desviación estándar de 0,34 tanto para el trayecto de ida como para el de regreso; y para el enlace Uniagustiniana Tagaste – Colegio Agustiniano Norte, con una longitud de 9,68 km, se presenta una desviación estándar de 0,30 tanto para el trayecto de ida como para el de regreso, independientemente de la diferencia en los niveles de señal ida-regreso.

Aunque al realizar la simulación con la Recomendación UIT-R P.530-17 en el enlace Uniagustiniana Tagaste – Colegio Agustiniano Norte se recibe una señal mínima de -55,59 dBm, no se puede concluir que en realidad el enlace sea viable, puesto que en una parte del trayecto se observa que se degrada. Para que el enlace sea efectivo, se requiere aumentar la altura de la antena del extremo 1 a, por lo menos, 26,99 m, o la altura del extremo 2 a, por lo menos, 21,74 m o la altura de ambos extremos a, por lo menos, 20,93 m el extremo 1 y 15,93 m el extremo 2, tal como lo permite evaluar y predecir la Recomendación objeto de análisis.

4. CONCLUSIONES

Dependiendo del entorno del enlace a analizar se debe escoger la recomendación que se debería utilizar, por ejemplo, la UIT-R P.526-13 se recomienda para entornos rurales y mixtos, pero si en el entorno se prevén interferencias entre estaciones sería mejor usar la recomendación UIT-R P.452 ya sea que haya presencia de hidrometeoros o si el cielo está despejado.

Se evidencia que las recomendaciones UIT-R P.526-13, UIT-R P.452 y la UIT-R P.530-17 hacen los cálculos de propagación usando métodos determinísticos, por lo tanto, este no va a ser un factor determinante en la elección del método a usar.

El análisis permitió confirmar que para aplicar la Recomendación UIT-R P.530-17 el trayecto directo entre ambos extremos debe estar libre de obstáculos, como mínimo, al 60% del radio de la primera zona de Fresnel para que se cumplan las condiciones de propagación en el espacio libre.

Se confirma que al usar señales con frecuencias en las bandas de SHF y EHF (señales milimétricas) las atenuaciones debido a la rugosidad de la tierra, superficies de agua y precipitaciones, se vuelven significativas; caso opuesto a lo que ocurre con señales que tienen frecuencias inferiores.

El análisis demostró que la atenuación por difracción, en el caso de trayectos medios (del orden de los 10 km), tiene un peso relativo importante en el balance extremo a extremo del enlace.

REFERENCIAS

- [1] Xirio online. (2020). Métodos de cálculo. Recuperado: http://www.xirio-online.com/help/es/compute_method.htm.

- [2] UIT-R. (2009). Recomendación UIT-R P.526-11 Propagación por difracción. Recuperado: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-11-200910-S!!PDF-S.pdf.
- [3] UIT-R. (2013). Recomendación UIT-R P.526-13 Propagación por difracción. Recuperado: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-13-201311-S!!PDF-S.pdf.
- [4] Xirio online. (2020). Deygout. Recuperado: <http://www.xirio-online.com/help/es/deygout.htm>.
- [5] Deygout, J. (1966). Multiple knife-edge diffraction of microwaves. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 4, 480-489.
- [6] Xirio online. (2020). REC. UIT-R P.452. Recuperado: http://www.xirio-online.com/help/es/rec_452.htm.
- [7] UIT-R. (2015). Recomendación UIT-R P.452-16. Procedimiento de predicción para evaluar la interferencia entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra a frecuencias superiores a unos 0,1 GHz. Recuperado: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.452-16-201507-I!!PDF-S.pdf.
- [8] UIT-R. (2017). Recomendación UIT-R P.530-17. Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa. Recuperado: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-17-201712-I!!PDF-S.pdf.

Análisis a la implementación de comunicaciones utilizando tecnología Long Range LoRa

Carlos Andrés Gómez Ruiz
Ramiro Osorio Díaz
Universitaria Agustiniiana
Colombia

El desarrollo de la industria 4.0 ha traído nuevos temas a la mesa de la conectividad y las telecomunicaciones. Se ha empezado a hablar ampliamente de Low Power Wide Area Network (LPWAN) que son redes caracterizadas por usar dispositivos de baja potencia, bajo consumo eléctrico, y amplia cobertura. Sin embargo, el uso de las redes LPWAN es distinto al que la mayoría de redes ha dado el humano para transmitir su información (su voz y sus datos); las redes LPWAN se usan para transmitir información por cortos periodos de tiempo y de corta longitud, muy útil para llevar datos digitales de equipos electrónicos encargados de sensar variables o de accionar dispositivos. A este tipo de comunicaciones y dispositivos se les llama como el Internet de las Cosas. Así las redes LPWAN están llamadas a crear una nueva experiencia en conectividad de pequeños y masivos dispositivos electrónicos. Dentro de las redes LPWAN sobresalen varias alternativas de solución. En este trabajo se analizó la solución conocida como Long Range (LoRa) dado a que se ha constituido como la tecnología de estándares más abiertos, lo que permite la masificación de dispositivos y software para su implementación. Ya que las redes LPWAN se diseñaron para transmitir datos digitales, es importante entender su desempeño en ambientes reales. Este trabajo aborda el desarrollo de pruebas experimentales en dos entornos típicos de las ciudades latinoamericanas para la recolección de datos usando equipos de soluciones LoRa donde se logra capturar información en distintas posiciones geográficas alrededor de las ubicaciones donde se han dispuestos los equipos de transmisión. Se analiza cómo las condiciones cambiantes en la presencia de amplias estructuras que imponen pérdidas considerables en la propagación de las transmisiones, condicionan el desempeño de las soluciones.

1. INTRODUCCIÓN

La década de los 2020s trae a las sociedades modernas unos nuevos retos en cuanto a desarrollos tecnológicos implementados en comunidades altamente conectadas. Tal vez el más importante se refiere a la masificación de la conectividad hacia las cosas, conocido como Internet de las Cosas o IoT por sus siglas en inglés, que supone conectar grandes cantidades de dispositivos electrónicos. Pero tener éxito en Internet de las cosas se basa en la comunicación efectiva y eficiente de datos hacia y desde los dispositivos. Al reconocer la potencia total de los sensores inteligentes, ayuda a comprender mejor los beneficios de las técnicas confiables de calidad de servicio (QoS) [1].

Los dispositivos electrónicos no se conectan a las redes de datos con las mismas necesidades que lo hacen las personas o los típicos dispositivos de red que estas usan, por ello se han desarrollado diferentes tipos de redes de acceso para las necesidades de conectividad de dispositivos Internet de las Cosas (IoT), redes de bajo consumo eléctrico y amplias coberturas que ahora se conocen como soluciones LPWAN. LPWAN es una nueva solución para IoT. Este tipo de redes ya tiene varias implementaciones específicas como LoRa, Sigfox, Weightless, RPMA y otras. Debido al largo alcance inalámbrico, el bajo consumo de energía y los numerosos nodos de baja velocidad de las redes superpuestas se pueden organizar en la parte superior de LPWAN.

Pequeñas piezas de datos como mensajes de texto, fotografías de baja calidad, etc. pueden ser enviadas sobre estas superposiciones y pueden ser de gran importancia para los servicios de emergencia. Cuando se organiza una red superpuesta a través de LPWAN es importante cumplir con los requisitos de calidad de servicio (QoS) presentes en la red base para evitar el mal funcionamiento de sus servicios. En este documento se presentan los resultados de un estudio experimental de medición de la QoS en redes LoRaWAN [2].

LoRa utiliza un espectro sin licencia y es un protocolo asíncrono. LoRa es basado en la modulación CSS puede manejar interferencia, multitrayecto y desvanecimiento, pero no puede ofrecer el mismo QoS que NB-IoT puede proporcionar. Esto se debe a que NB-IoT utiliza un espectro licenciado y su protocolo síncrono con franjas horarias es óptimo para la QoS. Sin embargo, esta ventaja de la QoS está en el gasto del costo. Las subastas de espectro de banda licenciada del espectro de sub-GHz son típicamente de más de 500 millones de dólares por MHz. Debido al compromiso entre la QoS y el alto costo del espectro, las aplicaciones que necesitan QoS prefieren el NB-IoT, mientras que las aplicaciones que no necesitan una alta QoS deben elegir la LoRa [3].

En el desarrollo e implementación de un sistema de comunicación, QoS es uno de los principales objetivos que deben considerarse. Lo mismo ocurre con LoRa, que también es un sistema de comunicación diseñado para implementarse en IoT. Sin embargo, el enfoque de IoT es un sistema de baja potencia que podría manejar una gran cantidad de dispositivos finales, diferentes con otro tipo de comunicación que se enfoca en la velocidad y el ancho de banda para transferir archivos multimedia.

Para alcanzar la máxima efectividad, se debe configurar un sistema LoRa con el Factor de dispersión (SF) correcto basado en la distancia entre el cliente y la puerta de enlace. Este estudio había llevado a cabo una prueba para analizar el mejor SF utilizado en varias distancias, utilizando la banda de frecuencia ISM de 925 Mhz en Indonesia. Según la medición, las recomendaciones de SF son SF7 para un rendimiento máximo, SF8 para un equilibrio de alto

rendimiento y capacidades de largo alcance, y SF11 para un alcance máximo y un rango óptimo para la aplicación LoRa [4].

En [5] se presenta un modelo matemático preciso de baja potencia de transmisión de datos en una red de sensores LoRaWAN, que permite la validación precisa de QoS contemplando claves índices como la capacidad de la red y el índice de pérdida de paquetes. Dado que las redes LoRaWAN operan en el espectro sin licencia, el modelo tiene en cuenta las fallas de intentos de transmisión causadas por ruido en el canal. Dados los requisitos de QoS, se puede usar el modelo para estudiar cómo el rendimiento de una red LoRaWAN dependiendo de la carga de tráfico y otros parámetros del entorno.

[6] realiza un análisis en cuanto a la capacidad límite del protocolo LoRaWAN en cuanto a mediciones inteligentes utilizando simuladores que permiten recrear el ambiente muy cercano al real en ambientes interiores, utilizando momentos críticos en cuanto a tráfico en la ciudad de Paris. Teniendo como resultado un área de cobertura de 17km cuadrados utilizando 19 gateways a 1 km de distancia entre ellos, teniendo un 98% de QoS. Esto solo considerando la transmisión de mensajes, pero llegando al límite en cuanto comiencen la entrada de mensajes descendentes. En [7] los autores desarrollan un algoritmo de movilidad adaptativa compatible con QoS para sistemas IoT basados en LoRa que se adapta automáticamente a la configura con el nodo final, lo que permite en los resultados disminuir la pérdida y garantizar los requerimientos para brindar un excelente servicio y sobretodo funcional. Todo ello implementado en una red IoT.

2. MÉTODO

La medición fue realizada utilizando equipos industriales LoRa para poder entender el comportamiento real de una red de baja potencia que utiliza el protocolo. Fue necesario el desarrollo de dos ambientes reales de medición que permitieron la captura de datos para su análisis. Para el montaje se utilizó un equipo industrial *gateway* de protocolo LoRa con las siguientes características:

- Gateway LoRa Kerlink
- Modelo Wirnet iBTS compacto
- Rx 902-928MHz
- Tx 902-928MHz
- Sensibilidad hasta -141 dBm
- Antena Omnidireccional para exteriores colinear
- Antena modelo OA-915M06-NF
- Ganancia Antena de 6dB
- ROE de 915MHz.
- TX Power: configurable 5dBm - 30dBm.
- BW: 125KHz

El equipo transmisor fue instalado en un ambiente típico comercial caracterizado por la presencia de edificios de altura media usados para fines laborales y comerciales. También fue instalado en un ambiente típico residencial de ciudades latinoamericanas como la bogotana, que es caracterizada por estructuras de baja altura y usadas para fines residenciales. Un nodo LoRa usado para la medición remota tiene las siguientes características:

- Módulo LoRa: SX1276
- Ganancia antena: 3dBi
- Máxima potencia: 1W
- Impedancia de entrada: 50Ω

Con el ambiente desarrollado fue posible obtener información relativa a potencia de recepción RSSI, nivel de señal a ruido SNR, distancia entre transmisor y receptor, y tiempo en el aire. Se obtuvo gran cantidad de datos con la estructura mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Estructura de datos obtenidos.

ID	Distancia (mts)	RSSI (dBm)	SNR (dB)
1	85	-56	8,3
2	203	-74	8,4
3	209	-77	8,2
4	87	-70	8,1
5	117	-92	8,3
6	107	-95	10,6
7	127	-105	-20,6
8	171	-99	10,1
9	201	-105	-20,8
10	258	-107	-20,4

Sobre los datos recolectados se analizaron sus correlaciones entre las variables obtenidas usando las ecuaciones que explicara más adelante. Para la recolección de las muestras se realizó muestreo variando la posición geográfica del nodo de medición, en torno a diferentes direcciones partiendo como centro la ubicación del equipo transmisor. En la Figura 1 se muestra una representación geográfica de las muestras tomadas en uno de los ambientes estudiados. Cada muestra se georeferenció para poder hacer cálculos de distancias. La Figura 1 también muestra las mayores potencias RSSI con una representación de burbuja más grandes.

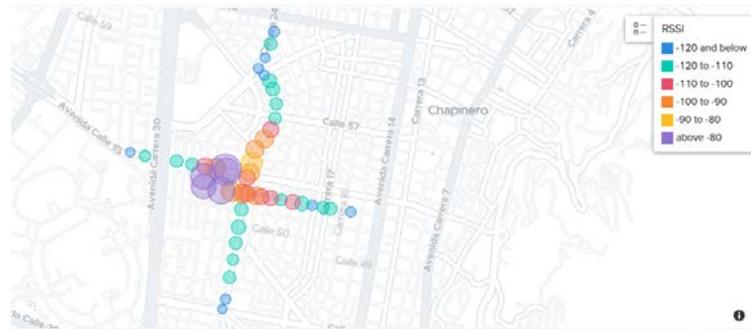


Figura 1. Toma de muestras georeferenciada

En un sistema de comunicación, la calidad del servicio (QoS) es uno de los elementos a tener en cuenta para transmisión de datos en una red de dispositivos IoT, bajo el protocolo LoRa. Con base en los estudios realizados en [2, 4, 5]; el QoS se evalúa teniendo en cuenta los siguientes parámetros, como son las pérdidas de paquetes (PLR), rendimiento (Throughput), retraso o la demora y RSSI; con estos datos, se sugiere cual es el mejor valor factor de dispersión correcto (SF) los cuales varían entre 7 al 12, que se debe utilizar en un sistema basado en QoS y para una distancia específica [4]. Basado en lo anterior se construyó la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros para evaluar QoS

Parámetro	Pérdidas De Paquetes(PLR)	Rendimiento o Throughput	Retardo
QoS	Se mide comparando paquete enviado por el cliente y el paquete recibido por la puerta de enlace en proceso de sondeo de datos.	Se mide comparando bit recibido con el tiempo transcurrido.	Se mide contando El tiempo necesario para entregar 1 paquete desde el cliente a la puerta de enlace.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis de comportamiento de los entornos residencial y comercial

Tomando los datos de la Tabla 1, se construyeron las gráficas de correlación (RSSI vs Distancia, SNR vs Distancia), para los diferentes ambientes diseñados como son de tipo comercial y residencial. El primer análisis importante a realizar se refiere a la significativa diferencia en las distancias sobre las cuales se pudo obtener comunicaciones satisfactorias entre el equipo transmisor y el nodo receptor. En la Figura 2 se muestran las proporciones de distancias máximas logradas, en las cuales se puede evidenciar que el sector comercial por sus características de infraestructuras compleja solamente pudo lograr comunicaciones a una instancia muy inferior, aproximadamente el 17% de la distancia alcanzada en el entorno residencial.



Figura 2. Diferencias en distancias máximas logradas en las comunicaciones de los entornos comercial y residencial

La dificultad de tener línea de vista directa en el entorno comercial reduce bastante la posibilidad de establecer comunicaciones entre los dispositivos LoRa a largas distancias. En el entorno residencial es más factible el establecimiento de comunicaciones en línea de vista, por lo cual la distancia de comunicación aumenta, sin embargo, las muestras de estos dos entornos evidencian unas características muy interesantes, que van desde diferencias en la calidad de las mediciones, dispersiones y comportamientos muy diferentes que se muestran a continuación.

La tecnología probada trabaja con anchos de banda de 125 KHz. Y el ambiente típico de las pruebas en los dos entornos se refiere alrededor de 13°C o 55°F. Con esto es posible calcular el ruido térmico, que se asocia directamente con el piso de ruido para este tipo de aplicaciones. En la ecuación (1) se hace el cálculo del ruido térmico.

$$N = KTB \text{ (Watt)} \quad (1)$$

Donde:

N = Potencia de ruido térmico (W)

K = Constante de Boltzman ($1,38065 \cdot 10^{-23}$)J/K

T = Temperatura en grados Kelvin

Se obtiene una potencia de ruido térmico de $4.5 \cdot 10^{-16}$ Watts, o -123.4 dBm. Este factor es importante ya que limita la posible potencia de recepción RSSI.

En la Figura 3 se muestra un análisis de boxplot de las muestras de RSSI y SNR. El diagrama de boxplot consiste en un rectángulo con los lados superior e inferior a los niveles de los cuartiles, una línea horizontal a nivel de la mediana, y los bigotes, de longitud 1,5 veces el rango intercuartíl, añadido en la parte superior e inferior. Los puntos fuera de estos límites se representan y son posibles valores atípicos [9]. Esta técnica permite identificar cada una de las muestras que representa valores atípicos. En la Figura 3 se puede identificar la poca dispersión que existen entre las muestras obtenidas en el entorno comercial. Como se puede observar, existen muy pocas muestras atípicas y la gran mayoría de muestras se concentran los tres cuartiles; esto indica que los niveles de potencia de recepción RSSI y de nivel de señal a ruido SNR no tiene cambios abruptos, y en general, cambian de forma proporcional.

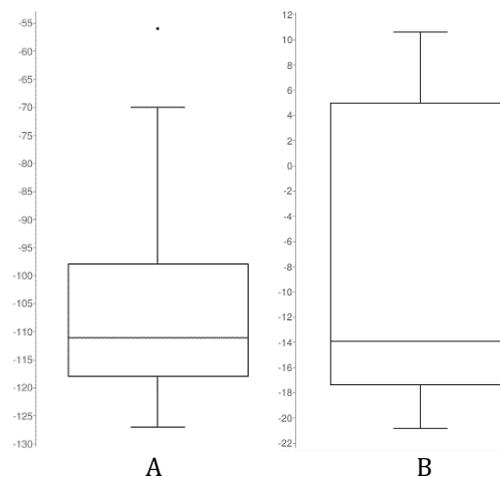


Figura 3. Análisis de Boxplot de las muestras tomadas en entorno comercial: A) Medidas de RSSI, B) Medidas de SNR

Las gráficas de dispersión usadas en las Figuras 4, 6 y 7 se aplican ampliamente en la visualización científica para encontrar agrupaciones, patrones y tendencias en los datos empíricos bivariados. Cada elemento de datos se visualiza como un punto en el plano, por ejemplo, usando un punto simbólico o color. Además, las gráficas de dispersión a menudo muestran líneas de tendencia o de contorno. Las dos dimensiones que se muestran en un gráfico de dispersión suelen ser de diferentes unidades [10] por ejemplo, un gráfico de dispersión muestra la relación entre las mediciones por niveles de potencia de recepción (en dBm) y las medidas de nivel de señal a ruido, SNR (en dB). A menudo, cada una de las dos unidades de los datos de entrada se grafican simplemente a una unidad geométrica en el dibujo.

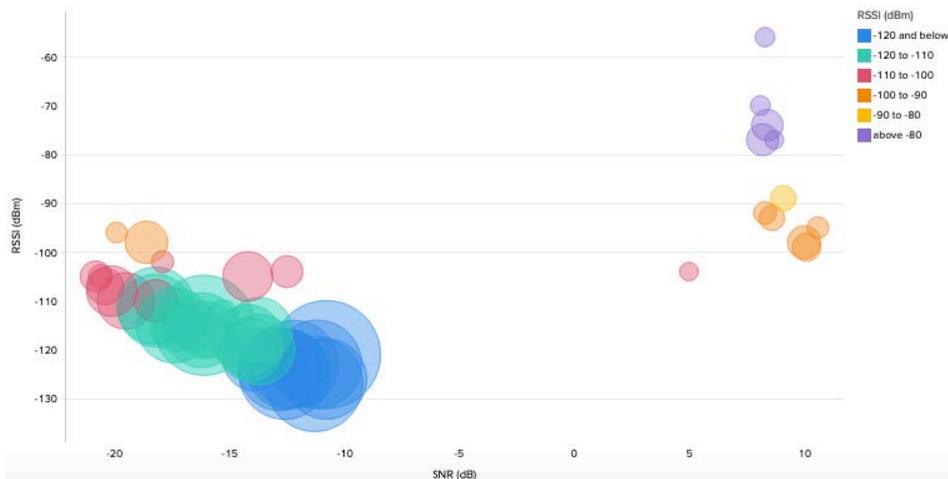


Figura 4. Gráfico de dispersión que correlacional el RSSI, SNR y distancia en un entorno comercial

En la Figura 4 se grafica la relación existente en un diagrama de dispersión del RSSI vs SNR en un entorno comercial, y el efecto de la distancia de transmisión representado en el tamaño de las burbujas; entre más grande la burbuja, mayor la distancia representada en la muestra. Se puede observar que los valores altos de SNR están en su mayoría

relacionados con potencias altas de recepción, y cortas distancias, mientras que los valores de SNR bajos se relacionan directamente con potencias de recepción RSSI bajas y distancias largas. Hay unas medidas de potencias intermedias, alrededor de los -100dBm, que conllevan a valores de SNR altos y bajos, allí se vé como factor diferenciador la distancia de transmisión.

En la Figura 5 se muestra un análisis de boxplot en el cual se puede identificar la gran dispersión que existen entre las muestras obtenidas en el entorno residencial, más aún si se contrasta con las gráficas de la Figura 2. Como se puede observar, existen muestras atípicas en rangos muy lejanos de los tres cuartiles, lo cual indica cierta inestabilidad en las muestras obtenidas. Es importante para la interpretación de esta Figura, resaltar que aquí se están representando muestras con distancias mucho mayores que en el entorno comercial.

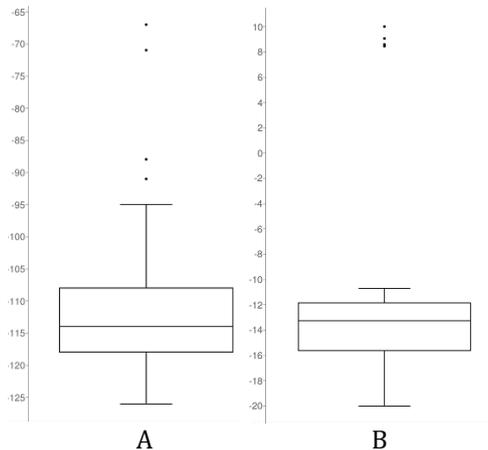


Figura 5. Análisis de Boxplot de las muestras tomadas en entorno residencial: A) Medidas de RSSI, B) Medidas de SNR

En la Figura 6 se muestra la relación existente en un diagrama de dispersión del RSSI vs SNR en un entorno residencial, y el efecto de la distancia de transmisión representado en el tamaño de las burbujas; entre más grande la burbuja, mayor la distancia representada en la muestra. Se puede observar que los valores altos de SNR son escasos y todos están relacionados con potencias altas de recepción, y cortas distancias, mientras que los valores de SNR bajos se relacionan directamente con potencias de recepción RSSI bajas y distancias largas.

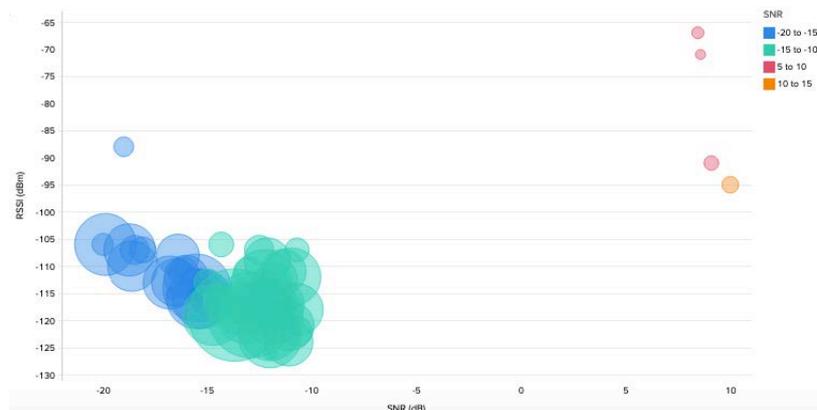


Figura 6. Gráfico de dispersión que correlacional el RSSI, SNR y distancia en un entorno residencial

En la Figura 7 se observa en un mismo diagrama de dispersión, todas las muestras de los dos entornos, residencial y comercial, representando las tres variables de SNR, RSSI y distancia. Las muestras de color amarillo corresponden a las del entorno residencial y las del color azul a las muestras el entorno comercial. Nuevamente la distancia de transmisión es representada en el tamaño de las burbujas; entre más grande la burbuja, mayor la distancia representada en la muestra. Se puede observar que hay una clara diferencia en la distribución de muestras de alta relación de señal a ruido, SNR, típicamente asociadas a mejores condiciones para la comunicación efectiva; el entorno comercial tiene mayor cantidad de muestras allí. También resalta la gran diferencia en las distancias logradas, donde el entorno residencial logra obtener muestras muy superiores que el entorno comercial.

Como se ha mencionado con anterioridad, la diferencia fundamental de los dos entornos en la compleja estructura del entorno comercial con presencia de grandes estructuras que significan grandes pérdidas en la propagación, así como la difícil consecución de líneas de vista.

En la Figura 7 también es evidente la alta concentración de muestras con SNR bajos, típicos de soluciones de redes de baja potencia como lo son la tecnología LoRA.

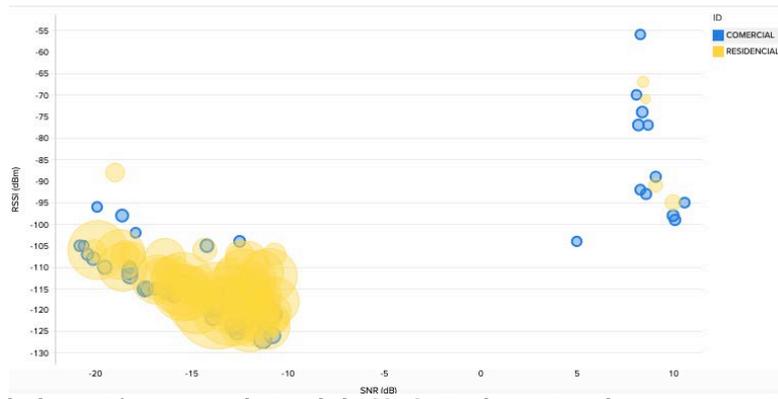


Figura 7. Gráfico de dispersión que correlacional el RSSI, SNR y distancia en los entornos residencial y comercial

Para profundizar más sobre el impacto en la distancia en las mediciones de RSSI y SNR se realiza el análisis de correlación de la Figura 8. En las gráficas de las Figura 8A y 8C (RSSI vs distancia), se observa un comportamiento de varios picos de la intensidad de la señal recibida (RSSI), en diferentes distancias (como 85, 203, 209 mts), para tener una mejor apreciación, se traza la línea de tendencia de RSSI; la cual nos indica que, a menor distancia, existe una mejor recepción de la señal, y a una mayor distancia menor recepción de la señal de RSSI. Hay que destacar que en un ambiente residencial la intensidad de señal recibida es mucho mejor, que para un ambiente comercial.

Realizando un análisis de las gráficas Figuras 8B y 8D (SNR vs distancia), se observa un comportamiento de varios picos de la relación señal a ruido (SNR), en diferentes distancias (como 78, 107, 171 mts), para tener una mejor apreciación, se traza la línea de tendencia de SNR; la cual nos indica que, a menor distancia, existe una mejor SNR, y a una mayor distancia, peor la relación señal a ruido SNR. También se identifica que en un ambiente residencial la relación señal a ruido es peor, que en el ambiente comercial.

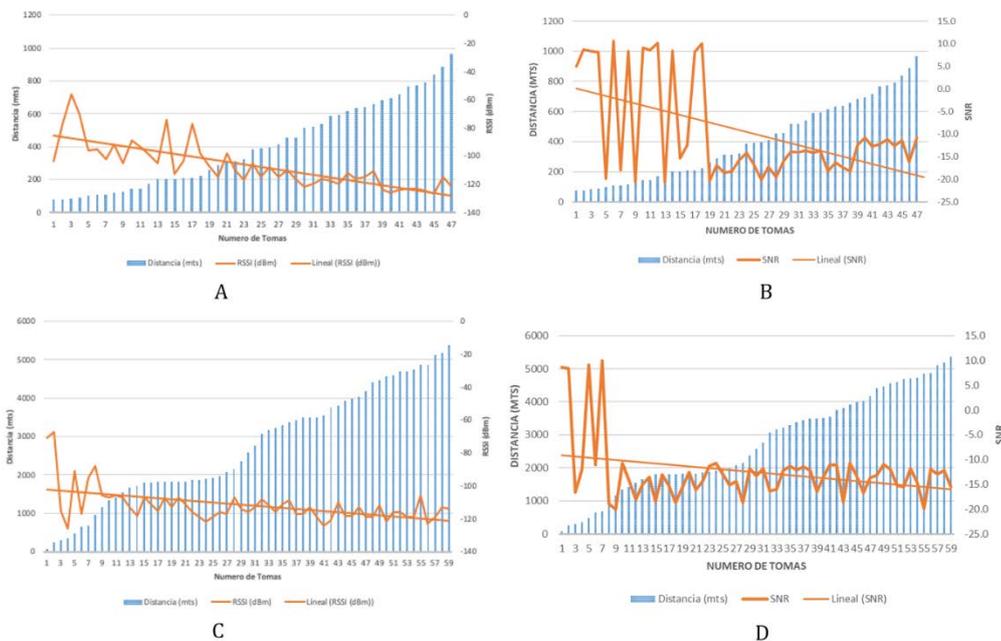


Figura 8. Análisis de correlación: A) RSSI vs distancia en entorno comercial, B) SNR vs distancia en entorno comercial, C) RSSI vs distancia en entorno residencial, D) SNR vs distancia en entorno residencial

3.2 Análisis de transferencia de datos

Luego de entender las diferencias en los entornos estudiados, y de ver como las variables de RSSI, SNR y distancia se correlacionan, es necesario evaluar otras variables asociadas a la transmisión de datos. LoRa emplea una velocidad de datos (data rate) variable, manejando factores de dispersión (spreading factor SF) ortogonales, permitiendo al diseñador del sistema intercambiar la velocidad de datos por el rango o potencia, a fin de optimizar el rendimiento de la red en un ancho de banda constante; opera en los anchos de banda ISM.

Debido a la menor dispersión de datos, y a la mayor cantidad de muestras con SNR positivo, se decide tomar las mediciones del entorno comercial para realiza análisis basados en Tabla 2 (parámetros para evaluar la calidad de servicio). Se calcula la trasferencia de datos nominal (Bit rate R_b), y luego se calcula el rendimiento o Throughput, como también los siguientes parámetros como son las pérdidas de paquetes (PLR) y las transferencias de datos efectivas (DTE).

El primero paso que se debe tener en cuenta es la tasa de transferencia de datos nominal, la cual se puede calcular con la ecuación (2). Las variables que se aplican en dicha ecuación depende significativamente del factor de dispersión o propagación (SF), dicho factor está basado en la distancia que existe entre el cliente (nodo IoT) y su dispositivo Gateway. También se debe tener en cuenta que el ajuste, se calcula utilizando una tasa de código (CR) de 4/5; y el ancho de banda (BW) a tener en cuenta es para un canal de 125 kHz.

$$Rb = SF \frac{4}{2^{SF}} \frac{CR}{BW} \quad (2)$$

Donde:

SF = Factor de dispersión

BW = Ancho de banda

CR = Tasa de Código

Con la anterior ecuación se puede calcular la siguiente Tabla 3 [8], la cual se muestra las diferentes tasas de transferencia de datos nominal, esta medida en bits por segundos, para los diferentes valores del factor de dispersión o de propagación (SF) la cual varía entre 7 a 12. El SF también muestra la relación entre el ancho de banda de la señal y la velocidad de símbolos. Manteniendo el ancho de banda constante, es posible mejorar la sensibilidad del receptor aumentando el tiempo en aire (duración de la transmisión de un paquete). Más precisamente, cada incremento del SF en una unidad, en LoRa desde el valor mínimo 7 hasta el valor máximo 12, corresponde a una duplicación del tiempo en aire y una disminución de la sensibilidad del receptor [11].

Tabla 3. LoRa Tasas de transferencia de datos [8]

SF	Bit rate (bps)
7	5469
8	3125
9	1758
10	977
11	537
12	293

Como segundo paso se calcula con las ecuaciones (2), (3), y (4), pero antes se debe tener en cuenta los valores del tiempo en el aire para las diferentes distancias tomadas, en especial para 100, 200,500, y 900 metros, debido que muestran la variación del tiempo transcurrido más significativo; Con lo anterior se ve reflejado en la Tabla 4.

$$\text{Rendimiento o Throughput} = (\text{paquetes recibidos}) / (\text{tiempo Aire}) \quad (2)$$

$$\text{PLR o pérdidas de paquetes} = (\text{Paquete enviado} - \text{Paquete recibido}) * 100\% \quad (3)$$

$$\text{DTE o Transferencias de datos efectivas} = 1 - [(\text{datos Teórico} - \text{Throughput}) / (\text{datos teóricos})] * 100\% \quad (4)$$

Tabla 4. Distancia Vs Tiempo Aire

Distancia (Metros)	Tiempo Aire (Seg)
100	0.082432
200	0.10292
500	0.113152
900	0.370688

Para complementar los parámetros de evaluación de la calidad de servicio (QoS), se tendrán en cuenta las siguientes ecuaciones respectivamente, que están tomado en la investigación [4]. Con base en las ecuaciones (2), (3), (4), y las distancias anteriores mencionadas; se realizan los calculamos los cuales se ven reflejados en la Tabla 5, donde se obtiene para diferentes distancias de transmisión los datos estimados de paquetes enviados y recibidos, así como el Throughput y la transferencia de datos efectiva. Se pueden notar grandes diferencias entre las medidas obtenidas a cortas y largas distancias.

Tabla 5. Throughput, Paquetes perdidos, Transferencias de datos efectivas

Distancia (Metros)	SF	Paquete Enviado	Paquete Recibido	Throughput (bit/Seg)	Paquete Perdido (%)	DTE (%)
100	8	104.1	100	1213.12	4.1	38.8
200	8	104.5	100	971.63	4.5	31.1
500	8	104.8	100	883.77	4.8	28.3
900	8	105	100	269.77	5	8.6

Para evaluar los resultados de la tabla anterior se diagramaron las siguientes gráficas Throughput vs Distancias, Paquetes Perdidos o PLR vs Distancias; y se realizó el siguiente análisis respecto a ellas. En la gráfica de la Figura 9, (Throughput vs Distancias), se puede observar el comportamiento del rendimiento o Throughput (es la capacidad efectiva de transferencia de datos sobre el enlace), lo cual dice que a menor distancia (100 metros) existe una mayor transferencia de datos, y mayor distancia (900 metros) se ve una menor transferencia.

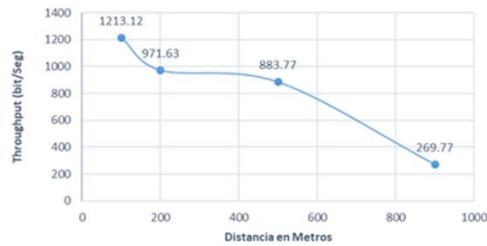


Figura 9. Throughput vs Distancia

Realizando una evaluación de la gráfica de la Figura 10, (Paquetes Perdidos o PLR vs Distancias), se puede observar el comportamiento de la Pérdida de Paquetes (PLR), lo cual indica que, a menor distancia (100 metros), menor pérdida de paquetes, y una mayor distancia (900 metros) se obtiene unas mayores pérdidas (PLR).

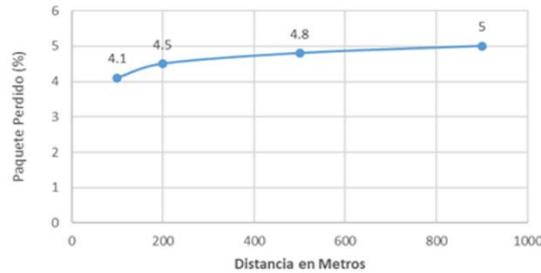


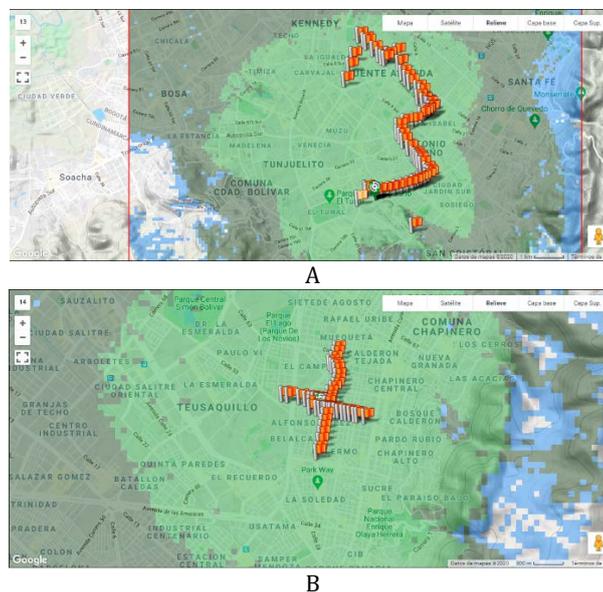
Figura 10. Paquetes Perdidos vs Distancia

Estas dos últimas gráficas muestran una fuerte relación del desempeño del Throughput y los paquetes perdidos, con la distancia de transmisión, así como sucedía con la relación entre esta distancia y los niveles de potencia RSSI y SNR que se analizaron en las primeras Figuras.

3.3 Simulación de cobertura

Dada la amplia importancia de la distancia en el comportamiento de los diferentes factores de la transmisión de datos via LoRA se decidió simular la cobertura por medio de un software de simulación de radiofrecuencia, sabiendo que no posee información sobre la ubicación y composición de los factores de pérdida de potencia asociados a las construcciones, especialmente presentes en el entorno comercial, con el fin de ver la factibilidad de usar esas herramientas para estimar la composición de variables de QoS.

En la Figura 11 se pueden ver los resultados de simulación de cobertura, de los dos entornos estudiados. En puntos rojos se muestra la localización real de puntos de muestra, los puntos extremos representan los lugares más lejanos donde se pudo establecer la comunicación entre el nodo LoRa y el gateway central de transmisión. Como puede observarse, en el entorno residencial de la Figura 11A los puntos rojos extremos no están significativamente lejos del borde de la sombra verde que representa la cobertura simulada. Mientras que en la Figura 11B se evidencia que, para el entorno comercial, los puntos rojos extremos están muy lejos del borde de las zonas verdes simulada.



B

Figura 11. Simulación de cobertura vs ubicación real de mediciones logradas en los entornos: A) Residencial y B) Comercial

Lo anterior indica que la cobertura se ve ampliamente afectada por la presencia de edificaciones de alta pérdida en el camino de radiación, como lo muestra la gran diferencia en la Figura 11B.

4. CONCLUSIONES

La diferencia entre las mediciones y análisis realizados en los ambientes referidos a los entornos comerciales y residenciales demuestran una gran dependencia en el desempeño de redes LoRa de la cantidad de obstáculos y presencia de línea de vista. El ambiente comercial caracterizado por la presencia de construcciones amplias y robustas ha mostrado complicaciones para garantizar líneas de vista que permitan el establecimiento de comunicaciones en largas distancias, la recepción de potencias mínimas necesarias y el establecimiento de una relación de señal a ruido suficiente para la decodificación de la información. En contraste el ambiente residencial caracterizado por construcciones de bajo nivel simboliza mejores condiciones para el establecimiento de líneas de vista con lo que se consigue a coberturas más amplias y mejor comportamiento en la red.

Las muestras tomadas en los dos ambientes evidencian que los dispositivos de las redes basadas en el protocolo LoRa consiguen trabajar eficientemente en niveles de potencia muy baja, muy cercanas al piso de ruido calculado para estas aplicaciones.

Los parámetros para evaluar la calidad del servicio (QoS), que se ven afectados por las distancias, son los valores de factores de dispersión o propagación, como también son las Pérdida de paquetes (PLR), y por último el retraso aumenta a medida, que aumenta la distancia. La distancia tiene el efecto contrario en el rendimiento; mientras tanto, el efecto sobre el retraso es demasiado pequeño para ser notado.

Como se puede verificar en los análisis de Throughput y paquetes perdidos, también hay una fuerte dependencia del comportamiento de estos factores respecto a la distancia de transmisión, y por lo tanto también se relacionan con bajos niveles de potencia de recepción RSSI y de niveles de señal a ruido.

Dada la falta de datos relacionados a las edificaciones irregulares presentes en los entornos urbanos, la simulación de cobertura de radiofrecuencia posee grandes dificultades para predecir coberturas reales en espacios tan complejos como el entorno comercial.

REFERENCIAS

- [1] Ray, B. (2016). Benefits of quality of service (QoS) in LPWAN for IoT. Link Labs.
- [2] Dvornikov, A. et al. (2017). QoS metrics measurement in long range IoT Networks. En 19th Conference on Business Informatics. Thessaloniki, Grecia.
- [3] Sinha, R., Wei Y. y Hwang, S. (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. ICT Express, 3, 14–21.
- [4] Widiyanto, E. et al. (2018). LoRa QoS performance analysis on various spreading factor in Indonesia. McGrawHill.
- [5] Bankov, D., Khorov, E. y Lyakhov, A. (2019). LoRaWAN Modeling and MCS allocation to satisfy heterogeneous QoS Requirements. Sensors, 19, 4204-4211.
- [6] Varsier, N. y Schwoerer, J. (2017). Capacity limits of LoRaWAN technology for smart metering applications. En International Conference on Communications. San Diego, USA.
- [7] Robbe, D. (2018). A QoS-Aware adaptive mobility handling approach for lora-Based IoT Systems. En 12th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems. México, México.
- [8] Olsson, K. y Finnsson, S. (2017). Exploring LoRa and LoRaWAN: A suitable protocol for IoT weather stations? Chalmers University of Technology.
- [9] Tukey, J. (1970). Exploratory data analysis. Addison-Wesley.
- [10] Fink, M. et al. (2013). Selecting the aspect ratio of a scatter plot based on its delaunay triangulation. Transactions on Visualization and Computer Graphics, 19(12), 2326-2335.
- [11] Moya, M. (2018). Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos. Universidad Politécnica de Valencia.

La falta de espacios para la recarga de dispositivos móviles, computadores portátiles u otros dispositivos similares en la Universidad de San Buenaventura, Medellín, es una problemática que hoy en día se está dando cada vez más por el aumento de dispositivos electrónicos que un estudiante, docente o personal de trabajo lleva consigo; smartwatches, audífonos inalámbricos, entre otros gadgets. Teniendo en cuenta esta necesidad y la disponibilidad actual de tecnologías amigables con el medio ambiente para la generación de energía, como los paneles solares fotovoltaicos, se identifica la oportunidad de proveer espacios renovados para la interacción social de la comunidad universitaria. Es por esto que se ha optado por desarrollar un prototipo de quiosco eco-amigable que ofrezca a las personas la posibilidad de cargar sus dispositivos, pero también de conectarse con otras personas y con servicios de información. Los módulos tipo kiosco ofrecen a las personas un espacio diferente de estudio y esparcimiento social en diferentes entornos, constituyéndose en soluciones basadas en energía renovable que son funcionales al mismo tiempo. Estos módulos pueden ser ubicados en bibliotecas, parques y universidades, entre otros lugares. Los módulos aprovecharán la energía proveniente de la radiación solar a través del uso de paneles solares fotovoltaicos instalados en sus techos. Adicionalmente para hacer la experiencia más funcional, se tiene la posibilidad de aprovechar la infraestructura del kiosco para realizar monitoreo de variables ambientales y generar información de utilidad para la comunidad a partir del análisis de los datos captados. Finalmente, en el caso del campus de la universidad, los módulos se constituyen en sí mismos en una oportunidad para la experimentación, la investigación y la realización de proyectos de aula.

1. INTRODUCCIÓN

El escenario actual muestra que el mundo explora nuevas posibilidades en cuanto a las maneras de suplir los requerimientos energéticos de los ciudadanos, las industrias y los gobiernos. A pesar de su impacto negativo sobre el clima y el medio ambiente del planeta, los combustibles fósiles, formas de energía no segura y generación de energía basada en recursos naturales no renovables, aun ocupan un gran porcentaje del potencial de suministro mundial [1]. Gradualmente, en diferentes países se han dado cambios hacia la adopción de energías alternativas, en cierta medida por un creciente grado de concienciación ciudadana.

Entre las formas de energía alternativa más difundidas a nivel mundial se encuentra la energía solar fotovoltaica, que ha ganado mucho terreno durante las últimas décadas [2]. A nivel local podemos afirmar que en los últimos años la adopción de generación de energía basada en paneles solares fotovoltaicos ha ido en incremento en el país y en la ciudad [3]. Por su ubicación geográfica, Medellín presenta muy buenas opciones para seguir aprovechando este recurso de energía. Los datos del Atlas de Radiación Solar del IDEAM, muestran que la ciudad de Medellín presenta una cifra favorable para el desarrollo de aplicaciones de generación de energía alternativa basado en la opción solar-fotovoltaica [2].

El presente trabajo muestra el resultado de un proyecto que se lleva a cabo gracias a la integración de capacidades de la Universidad a través de sus investigadores y estudiantes y de la empresa privada, en este caso, a través de la participación y apoyo de la empresa XDPro. Mediante la integración de capacidades de medición de variables propias del sistema solar fotovoltaico constituido por el kiosco y de medición de variables ambientales y climáticas (como temperatura, humedad relativa y material particulado), se utilizarán elementos del Internet de las Cosas para proveer información de interés al usuario, como una forma de agregar valor a la solución planteada.

2. MARCO TEÓRICO

En el presente siglo, por aspectos como el crecimiento elevado de la población mundial, el agotamiento de recursos naturales, el cambio climático y otros aspectos socioeconómicos, ha tomado relevancia el uso y adopción de energías alternativas por parte de muchas personas, empresas y entidades públicas como parte de sus planes de gobierno. En el caso particular de Colombia, la adopción e implementación amplia de sistemas de energía solares fotovoltaicos es reciente en comparación con lo ocurrido en otros países del mundo [3].

En este momento se da una convergencia muy interesante en nuestro país en cuanto a dos aspectos; finalmente se ha alcanzado un punto en el que existen precios razonables y una muy buena línea de suministros para sistemas fotovoltaicos e, igualmente, en los últimos años, se han dado avances importantes en cuanto a regulación que favorece el uso e implementación de sistemas basados en este tipo de energía alternativa [4].

A continuación, se presenta una vista breve de diferentes opciones que se utilizan en la actualidad como posibilidades de energía diferentes a las tradicionales, es decir, diferentes a aquellas basadas en combustibles fósiles, a las basadas en el recurso hidráulico (generación hidroeléctrica) y diferentes a la energía nuclear. Las energías mostradas en la Tabla 1 se caracterizan por condiciones que favorecen su factibilidad, desde el punto de vista técnico, para su implementación a diferentes niveles (soluciones personales, residenciales, empresariales o despliegues de gran escala) y su aprovechamiento en el día a día por parte de las personas, comunidades, empresas y gobiernos.

Tabla 1. Algunas opciones de energías alternativas factibles de implementación y sus características

Energía solar fotovoltaica	Energía eólica	Recolección de energía
<p>La energía fotovoltaica involucra la conversión de la radiación solar en electricidad utilizando células o celdas solares. Los paneles solares existen como tecnología comercialmente disponible desde el siglo pasado. Desde esa época y desde principios de este siglo existen experiencias ciudadanas de experimentación, adopción e implementación de soluciones en diferentes países y continentes del mundo [1].</p> <p>En el caso local, la adopción ha sido más lenta, inicialmente por los altos precios de los paneles y de los dispositivos complementarios que hacen partes de los sistemas solares fotovoltaicos (como controladores de carga y baterías), también por diferentes dudas y vacíos en cuanto a regulaciones a nivel local [4].</p> <p>Otras variantes de aprovechamiento del recurso solar son las tecnologías solares pasiva (utilizada en climatización e iluminación), activa (calentamiento de agua, calefacción de espacios y refrigeración) y térmica (concentradores cilíndricos, platos parabólicos, receptores centrales y estanques solares) [2].</p>	<p>En este caso, la energía eléctrica se obtiene mediante la transformación en movimiento rotacional de la energía cinética generada por el paso del aire, en forma de viento, a través de un aerogenerador.</p> <p>Algunas observaciones para la utilización de la energía eólica en Colombia están relacionadas con la necesidad de disponer de vientos constantes, con velocidades considerables en metros por segundo, lo cual no es factible en muchas regiones del territorio nacional. Las instalaciones de generación eólica son en muchas formas más complejas que las instalaciones basadas en paneles solares [5].</p> <p>En Colombia, la instalación de aerogeneradores está focalizada en algunas regiones específicas con condiciones favorables. Uno de los proyectos más conocidos es el del parque Jepirachi de Empresas Públicas de Medellín, en el departamento de la Guajira.</p> <p>Actualmente está en marcha la construcción de dos proyectos de 212MW y 280MW en el departamento de la Guajira, en Maicao y Uribia, por parte de la empresa portuguesa EDP [6].</p>	<p>Otras alternativas de menor escala consisten en la generación de energía a partir de los movimientos que realizan las personas o a partir de sus actividades, en esta categoría se agrupan los dispositivos y técnicas que comprenden lo que se denomina <i>energy scavenging- energy harvesting</i>.</p> <p>Dentro de las posibilidades de <i>energy harvesting</i> encontramos generación a través de dispositivos piezoeléctricos, mediante variantes de energía mecánica y también a partir energía térmica. Los dispositivos que realizan la captación o colecta de esta energía se basan en nuevos materiales, compuestos y también en tecnologías de micro-maquinado [7] [8].</p> <p>En el país se han realizado diferentes proyectos de investigación en este campo [9]. También hay experiencias con empresas que se han probado localmente en la ciudad de Medellín como el proyecto acompañado por ruta N de la empresa Treevolt para la generación de energía a partir del paso de automóviles por dispositivos instalados en secciones de asfalto [10].</p> <p>Estas formas de recolección de energía se han considerado como una opción para proveer energía a accesorios y dispositivos personales, también para la alimentación de nodos con consumo reducido en redes IoT [7].</p>

Otras opciones de energías alternativas comprenden el uso del movimiento de las olas del mar (energía mareomotriz), para generar energía eléctrica. También existe la opción de obtener energía eléctrica a partir de recursos como la biomasa [2].

2.1 Sistemas solares fotovoltaicos

Un sistema solar fotovoltaico está constituido por varios componentes, para la planeación, operación y mantenimiento de uno de estos sistemas es importante considerar diferentes aspectos técnicos y las características de los dispositivos electrónicos que hacen o pueden hacer parte de este, dependiendo de los requerimientos existentes. Si bien el recurso del sol y su radiación es universal, técnicamente hablando, el potencial de generación depende de la ubicación geográfica del lugar en el que se va a instalar el sistema de generación de energía basado en paneles solares fotovoltaicos, la orientación e inclinación de los paneles también son aspectos a tener en cuenta para la instalación. La energía generada es directamente proporcional al área cubierta por los paneles. Afortunadamente, nuestro país, al estar cerca del Ecuador, presenta un muy buen potencial de generación con disponibilidad del recurso durante muchas horas a lo largo del año [2].

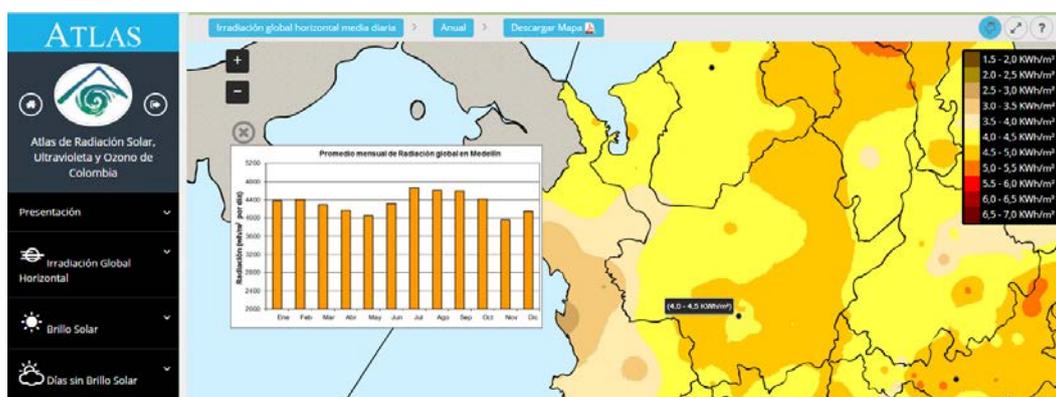


Figura 1. Promedio mensual de radiación solar para la ciudad de Medellín [11]

El atlas de radiación solar de Colombia provee información detallada por meses, de la radiación solar (expresada en KWh/m^2) para los diferentes sitios de la geografía nacional. Para Medellín tenemos que la radiación está entre 4.0 y 4.5 KWh/m^2 (ver Figura 1). En los recursos en línea del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, también se encuentra información del brillo solar, los días sin brillo solar, entre otros parámetros de interés.

Para la ciudad de Medellín, según datos del Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia, los valores de radiación en Wh/m² más altos en promedio, según la hora del día, se alcanzan entre las 8am y las 4pm. El promedio anual de días sin brillo solar es 1.44, con un promedio mensual que valores extremos de 0.51, para julio y agosto, y 2.35 para abril [2].

2.2 Componentes de un sistema solar fotovoltaico

Además de cerciorarse de contar con niveles de radiación suficientes para proveer la energía necesaria, según las soluciones proyectadas, y poder dimensionar las especificaciones de operación, a un nivel más técnico, la instalación de un sistema de energía solar fotovoltaico, por lo general, requiere de los siguientes componentes [12]:

- *Paneles solares fotovoltaicos:* son el componente principal del sistema de generación de energía por medio de la luz o radiación solar. Estos elementos entregarán una potencia de salida (en forma de voltaje y corriente) directamente proporcional a la cantidad de luz incidente a lo largo del día. Como regla práctica, se requieren paneles de mayor tamaño para poder entregar mayores potencias o, dicho de otra forma, alimentar una mayor cantidad de cargas requerirá un área mayor cubierta por paneles solares. Algunos aspectos como la tecnología de fabricación (paneles monocristalinos o policristalinos), si se trata de paneles rígidos o flexibles y la marca o fabricante afectan el costo de los paneles solares [12]. Existen paneles en el mercado con diferentes voltajes nominales de salida (5V, 6V, 12V, 18V, entre otros), sin embargo, un estándar de facto es trabajar a 12 V. Los paneles siguen la misma lógica que las baterías y fuentes de voltaje, por esta razón se pueden conectar en serie y en paralelo para obtener mayores niveles de voltaje o corriente.
- *Controlador de carga:* este se encarga de la protección de los baterías frente a sobrevoltajes o bajos voltajes que resulten en descarga profunda, este elemento es un mediador entre la potencia generada y la potencia requerida al sistema [13]. Normalmente, el controlador inhibe la entrega de energía si las baterías se encuentran por debajo del nivel de seguridad que proteja su correcto funcionamiento, esto puede darse en momentos de muy baja generación y altos requerimientos o durante la noche, cuando no hay generación por parte de los paneles.
- *Batería:* Es un dispositivo de acumulación de energía que se basa en principios electroquímicos para tal fin. La planeación y diseño deben realizarse de tal manera que el grupo de baterías recargables estén dimensionadas para que el sistema opere de forma autónoma. Diferentes tipos de baterías pueden ser utilizadas, desde baterías recargables de plomo-acido, hasta baterías especiales de gel o baterías de LiFePO₄, estas últimas de muy alta eficiencia, pero de precio muy elevado [14].
- *Inversor:* el inversor es un componente que se encarga de la transformación de la energía continua producida por los paneles solares en energía alterna la cual va a ser entregada a la carga, si esta así lo requiere [12]. Muchas cargas se alimentan de corriente continua directamente, si un sistema está planeado para alimentar solo este tipo de cargas, no se requiere del uso de un inversor.
- *Elementos de protección del sistema:* cualquier tipo de instalación debe seguir ciertas normas de protección, tanto de las personas como de los dispositivos conectados y demás elementos de la instalación. Entre los dispositivos que se pueden utilizar encontramos *breakers*, fusibles, elementos contra conexión incorrecta, sobrecarga, entre otros [12, 13]. Sumado a esto deben observarse procedimientos correctos de conexión, aislamiento y ubicación de los componentes del sistema en carcazas adecuadas, para uso en exteriores se recomiendan carcazas con norma IP65, IP66 o similares.

2.3 Marco regulatorio y normativo para sistemas solares fotovoltaicos en Colombia

En Colombia, mediante la ley 1715 de 2014 se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional [4]. En esta ley se establecen definiciones, marcos operativos y lineamientos para el desarrollo de la energía solar, de la energía eólica y la energía geotérmica, entre otras. También se habla del fomento de la investigación en estos ámbitos. En esta ley se dan los primeros pasos para habilitar la instalación de paneles solares en usuarios del mercado no regulado de energía, el uso de medidores bidireccionales y de incentivos gubernamentales en forma de beneficios tributarios para promover la adopción de la energía solar fotovoltaica por parte de los ciudadanos [2, 4].

El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas -RETIE y la Norma Técnica Colombiana NTC-2050 (Código Eléctrico Nacional) en su sección 690 también cubren aspectos específicos relacionados con la instalación de los paneles solares y los demás elementos del sistema (como controladores de carga y baterías). Algunas empresas prestadoras de servicio de energía eléctrica domiciliaria, actualmente trabajan en normativas para la interconexión de sistemas fotovoltaicos de sus usuarios a sus redes [2]. La resolución de la Comisión Reguladora de Energía y Gas -CREG 030 de 2018 aborda los trámites para el registro de conexión ante el operador de red de energía. Compañías como Empresas Públicas de Medellín, actualmente ofrece en su portafolio soluciones solares integrales para hogares y empresas [15].

2.4 Internet de las cosas

El Internet de las cosas podría denominarse como un paradigma que, más que un conjunto o reunión de tecnologías (redes inalámbricas, sensores inteligentes, analítica de datos, *cloud computing*, entre otras), constituye en sí mismo una nueva generación de redes y de intercambio de información que acompañará de manera determinante el devenir del mundo durante los próximos años a partir de todas las transformaciones, servicios y negocios que habilita [16]. Se estima que el Internet de las cosas o de los objetos (IoT, por sus siglas en inglés) estará compuesto por miles de millones de objetos interconectados en los próximos años, los objetos pueden ser instancias de software o dispositivos que pueden estar conectados o no a Internet, algunas personas consideran que se puede hablar de IoT también en aplicaciones de intranet que no necesariamente se conecten con el universo www. En el camino de esta evolución podríamos decir que hemos pasado por el internet de los computadores, luego por el internet de las personas y que ahora presenciamos el surgimiento y consolidación del llamado internet de las cosas.

2.5 Redes inalámbricas de sensores

Las redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Networks o WSNs) son uno de los pilares más importantes en los que se soporta el IoT actual. Estas redes, en principio, se basaron en estándares de la familia IEEE 802.X como IEEE 802.15.1. Tradicionalmente encontramos redes de sensores basadas en el estándar IEEE 802.15.4, este es un estándar orientado a las redes de área personal (con alcance de comunicación directa del orden de metros o decenas de metros) y tasas de transferencia bajas, más adecuadas para el envío de datos de mediciones obtenidos con sensores que al transporte de otro tipo de señales como audio y video que requieren un mayor ancho de banda y, por consiguiente, una mayor cantidad de bits por segundo [17]. Estos estándares y versiones comerciales de sus implementaciones comerciales (como Bluetooth, WiFi y Zigbee) así como el despliegue de WSN se popularizaron a principios de este siglo y desde esa época se han realizado todo tipo de aplicaciones orientadas al monitoreo de variables ambientales, monitorización de signos vitales, monitoreo de variables en procesos industriales, monitoreo de variables en casas y edificios, entre otras.

En los últimos años, con el advenimiento de las aplicaciones del IoT y su uso masivo a escala global encontramos estándares, tecnologías y enfoques que capitalizan los aprendizajes de las primeras generaciones de redes inalámbricas de sensores y se adaptan a los nuevos requerimientos de los objetos interconectados, es así como encontramos las redes de área amplia y bajo consumo de energía (Low Power Wide Area Network – LPWAN, por sus siglas en inglés). En esta nueva categoría encontramos especificaciones como LoRaWAN que está enfocado a cubrir distancias mayores por comunicación directa entre nodos y favorecer el bajo consumo de energía con tasas de transferencia más bajas que IEEE802.15.4 u otros existentes para favorecer el cumplimiento del ideal de alcanzar la operación inatendida de dispositivos con una misma batería operando por muchos meses, incluso por años [18].

2.6 Protocolos de comunicaciones para redes inalámbricas de sensores en el ámbito del IoT

La lista de protocolos, estándares y tecnologías de comunicación que pueden utilizarse en el internet de las cosas es bastante amplia (Tabla 2). Esto porque comprende desde redes de infraestructura tradicionales, como redes Ethernet y redes de comunicación celular y WiFi de uso extendido, pero también incluye redes de área personal IEEE 802.15.4, redes bluetooth, redes LoRa, Sigfox, comunicaciones de campo cercano (NFC: Near Field Communications), entre otras [17, 18]. Adicionalmente pueden incluirse algunos protocolos ubicados en diferentes capas del modelo OSI que también son utilizados ampliamente en el desarrollo de soluciones IoT.

Tabla 2. Estándares y tecnologías de comunicación ampliamente utilizadas en el IoT

IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1	LoRaWAN	NFC	Redes Celulares
Se puede decir que, en cierta forma, este fue el primer estándar orientado al internet de los objetos. Se trata de un estándar totalmente consolidado y de uso amplio.	Si bien Bluetooth en su enfoque clásico considera la posibilidad de despliegue de redes (<i>piconets</i>) estas no se orientaron o utilizaron como redes de sensores, más bien como redes de dispositivos ofimáticos o gadgets electrónicos [17].	La tecnología LoRa ha hecho su entrada a nuestro medio hace algunos años como una variante de comunicación inalámbrica abierta y deliberadamente orientada al mundo del IoT, con amplia y reconocida trayectoria en Europa.	La tecnología de comunicación de campo cercano se popularizó inicialmente con el uso de etiquetas (tags) de identificación por radiofrecuencia (RFID) y posterior a eso se utiliza como medio para habilitar pagos sin contacto con lectores a corta distancia y otras operaciones como consulta de datos y de saldo [21].	Es claro que estas redes no son un protocolo como tal, pero si incluyen una gran cantidad de estos y, además, al tratarse de una red de alcance geográfico prácticamente global tiene un papel preponderante en el despliegue de redes y en el desarrollo de soluciones IoT.
La comunicación se realiza a 250 Kbps y se soportan diferentes topologías de red [17].	En su versión de bajo consumo de energía (BLE: Bluetooth Low Energy) se enfoca de forma un poco más específica y trata de resolver una de las mayores desventajas de los dispositivos bluetooth	El universo LoRa tiene una connotación más cercana al mundo Open mientras que su contraparte Sigfox sigue un modelo comercial clásico [20]. LoRaWAN presenta un modelo de	Se puede incorporar a dispositivos móviles como también a tarjetas de crédito, débito,	Las mismas redes celulares se han ido acomodando al mundo IoT desde las redes 4G y 4.5G, e incluso más con lo que plantea 5G [22]. En muchos países el número de dispositivos móviles supera al número de habitantes, de ahí la
Teóricamente en algunas redes se pueden utilizar hasta				

unos 65000 nodos, pero esto es bastante complejo de implementar en aplicaciones prácticas.	clásicos la cual es su consumo elevado de energía ligada a sus tasas de transferencia (bps) igualmente elevadas [19].	comunicaciones orientado al alcance de mayores distancias (incluso de kilómetros en condiciones ideales) y consumo reducido de energía [18].	tarjetas para utilizar sistemas de transporte público o servicios similares. En general esta tecnología opera a corta distancia (centímetros). Su uso a mayores distancias requiere de antenas (portales) de dimensiones considerables.	importancia de estos en el mundo del IoT ya que en muchos momentos los dispositivos móviles servirán como gateways que servirán para enlazar las comunicaciones entre las capas inferiores (capa de percepción) de la arquitectura IoT con capas superiores de nivel de red y de servicios.
Zigbee es la versión comercial más conocida, pero también existen otras variantes como Xbee y MiWi.		Plantea principalmente el uso de nodos y gateways para alcanzar plataformas IoT en la nube cuando sea necesario.		

Actualmente en el mercado encontramos una gran cantidad de referencias de tarjetas o módulos que integran transceptores para realizar aplicaciones con todos los protocolos mencionados. Estos módulos pueden usarse en conjunto con tarjetas de prototipado rápido como Arduino e, incluso, algunas ya los traen incorporados. De esta forma, fácilmente se pueden realizar aplicaciones que involucran comunicación bajo el estándar IEEE 802.15.4, pero también comunicaciones bluetooth o BLE, los transceptores LoRa y los *gateways* también se consiguen en una gran cantidad de referencias, no así con Sigfox, cuya filosofía no permite un desarrollo abierto con tarjetas de prototipado. Igualmente pueden incorporarse módems GSM y módulos GPS para complementar las necesidades de comunicación en proyectos orientados al IoT [18-20, 22].

3. ESTADO DEL ARTE

La necesidad de recargar dispositivos móviles es recurrente en nuestro día a día, es así que se encuentran diferentes soluciones y propuestas en diferentes partes del mundo que han surgido para dar respuesta a esta necesidad común y que integran elementos de energía solar fotovoltaica en diferentes soluciones.

Solarkiosk E-HUBB es una solución tecnológica que se implementa en forma de una caseta que tiene un techo cubierto por paneles solares y que tiene laterales plegables, que, según sus creadores puede proveer energía de manera continua (24/7) y que está concebido para impactar comunidades con bajas posibilidades económicas en diferentes partes del mundo. Este proyecto se origina en Alemania y se documentan diferentes experiencias exitosas de uso especialmente en países africanos como Ghana. Como características novedosas de la solución se resaltan el apoyo a mujeres cabeza de familia, la posibilidad de apoyar la inclusión digital, posibilidad de utilizar servicios de purificación de agua y de refrigeración de medicamentos [23].

En Colombia, en un trabajo de grado para optar al título de ingenieros ambientales presentado en la Universidad Libre, se presentó en el año 2015 el diseño de un quiosco solar para recarga de dispositivos electrónicos como alternativa de ahorro de consumo de energía, lo novedoso de esta propuesta es que se contempla la realización de la estructura del quiosco utilizando botellas PET, haciendo una reutilización ecológica de materiales que son desechados por las personas. En el trabajo se hacen todas las consideraciones de diseño de los diferentes elementos del sistema, la estimación del recurso solar disponible en el sitio hipotético de instalación y también se hacen encuestas con las personas para sustentar la justificación del proyecto y tomar en cuenta las necesidades de los potenciales usuarios. No se tiene información acerca de si en algún momento el proyecto se materializó [24].

En otro trabajo de grado del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad de San Buenaventura Bogotá realizado en el año 2008, se presenta la propuesta del diseño e implementación de un cargador solar para dispositivos portátiles. En el trabajo se siguen todos los pasos para el dimensionamiento del sistema, como la estimación de cargas y del recurso de radiación solar y se diseña y construye un circuito de control junto con un prototipo final que integra los paneles solares. Es importante anotar que el trabajo solo plantea la construcción del dispositivo como algo que una persona pueda usar, pero no se realiza prueba de este ni instalación en exteriores [25]. En un trabajo realizado por dos investigadores de una universidad vietnamita llamado *Design and Simulation of a Photovoltaic-based Energy System for Mobile Device Chargers at Public Place* se presenta una propuesta de mobiliario urbano que interviene paradas de bus para integrar en estas un sistema de energía solar fotovoltaica que les permita a los usuarios cargar sus dispositivos móviles. En el trabajo se presentan los detalles del diseño de la estructura y se desarrollan cálculos y diferentes análisis circuitales de componentes del sistema [26].

4. MÉTODO

En lo relacionado con el sistema electrónico, de control y de visualización de las variables del sistema se ha seguido una metodología con los siguientes pasos:

1. Búsqueda y selección de los componentes
2. Diseño de los planos de conexiones

3. Programación del microcontrolador
4. Pruebas y depuración
5. Diseño y montaje de las tarjetas de circuito impreso
6. Desarrollo de la interfaz de visualización

La descripción de los pasos seguidos se muestra en la Figura 2.

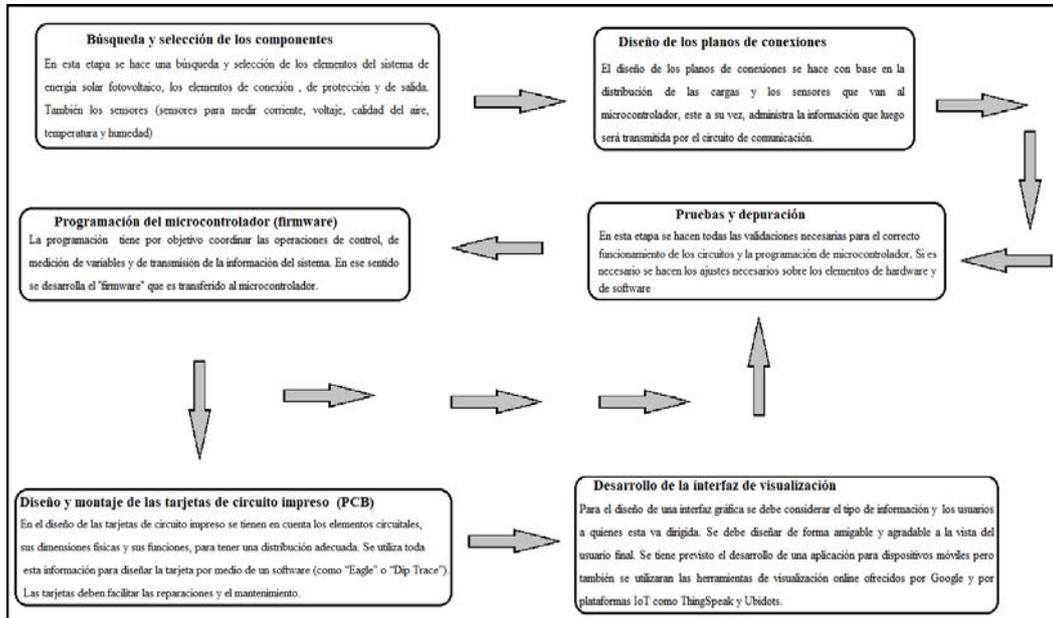


Figura 2. Ruta metodológica para el desarrollo del sistema electrónico, de control y de visualización

El esquema general de la solución que se ha desarrollado se muestra en la Figura 3. Más allá de construir un elemento de mobiliario urbano, se busca conectar con las personas y que estas a su vez desarrollen formas nuevas de interacción y de concienciación acerca de las energías alternativas y sobre variables climáticas y de calidad del aire. Todos los procesos de diseño y desarrollo que apuntan al logro de este objetivo tratan de responder a la idea del esquema general planteado. En otras palabras, lo que se busca con la idea planteada es superar la mera implementación de una solución tecnológica, sino articular también aspectos de conciencia ambiental y ciudadana.

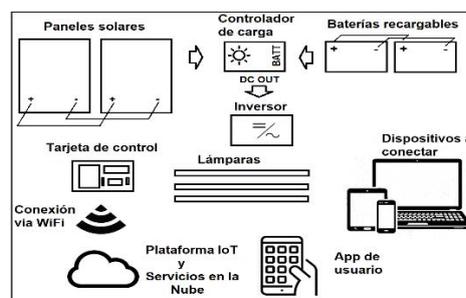


Figura 3. Vista general de la solución, componentes e interacciones

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como resultados significativos se puede mencionar que el diseño electrónico de todos los elementos del sistema se encuentra muy adelantado, cerca del 90%. Es de anotar que la actual situación actual de asilamiento obligatorio por la pandemia no ha permitido realizar pruebas en el campo, que son totalmente necesarias para proceder con la instalación y puesta en operación del prototipo, en el lugar que se ha previsto para su funcionamiento.

Se han realizado pruebas exitosas de comunicación exitosas con las herramientas de visualización, registro y almacenamiento de datos en la nube. También se trabaja en el desarrollo de una aplicación móvil (app) para los usuarios del sistema. En la app se presentarán aspectos relativos al comportamiento de la energía provista por el kiosco y su consumo por parte de los usuarios. Adicionalmente, se presentarán datos de humedad relativa, temperatura ambiente y cantidad de material particulado.

Como parte del proceso de desarrollo se han considerado diferentes sensores que puedan ser utilizados para obtener información acerca de la calidad del aire. En ese sentido, se han probado los sensores mostrados en la Figura 4 mediante una tarjeta de prueba realizada para tal fin.



Figura 4. Algunos sensores evaluados y sus características.

También se utilizó el sensor de bajo costo MQ135, el cual no aparece en la Figura. La conclusión a la que se llegó con este tipo de sensores es que su uso representa algunos inconvenientes desde el punto de vista técnico. Esto por su complejidad para obtener medidas fiables de compuestos de importancia como el monóxido de carbono, ya que se deben realizar procesos de calibración que requieren equipos y conocimientos especializados, no fácilmente disponibles en el medio local y que elevan los costos del proyecto. Otro aspecto que limita la utilización de los sensores de gas antes mostrados y mencionados, es el alto consumo de energía requerido para su operación. Estos sensores requieren el calentamiento de resistencias internas lo cual resulta en un consumo elevado y calentamiento permanente de algunos elementos circuitales, lo que cual puede reducir drásticamente su vida útil en un escenario de operación continua como el previsto (Figura 5).



Figura 5. Esquema de comunicaciones y algunos resultados obtenidos en pruebas con sensor de temperatura

Luego de ese análisis se ha optado por monitorear temperatura y humedad relativa, y como variable significativa en cuanto a la calidad del aire, la cantidad de material particulado mediante la cual se medirá con un sensor que funcione mediante principios electro-ópticos, como los de referencia PMS1003, PMS5003 y PMS7003 de Plantower que funcionan por difusión láser. El objetivo es proveer información fiable a los usuarios y los sensores elegidos cumplen con ese propósito. Hasta el momento se ha interactuado con la plataforma IoT llamada ThingSpeak y el servicio de Google llamado Firebase, como también los Google docs, específicamente las hojas electrónicas en línea.

Dentro del desarrollo del sistema se ha previsto ofrecer a los usuarios un tomacorriente de voltaje alterno para facilitar la conexión de dispositivos como computadores portátiles. Como medida de control y de protección del sistema se ha diseñado un circuito que interrumpa automáticamente la entrega de energía si se requieren corrientes muy elevadas (superiores a 2 Amperios). En esa situación se interrumpirá el suministro a la carga AC conectada al tomacorriente (Figura 7). Para las otras cargas se proveen conectores USB para sus procesos de conexión y carga.

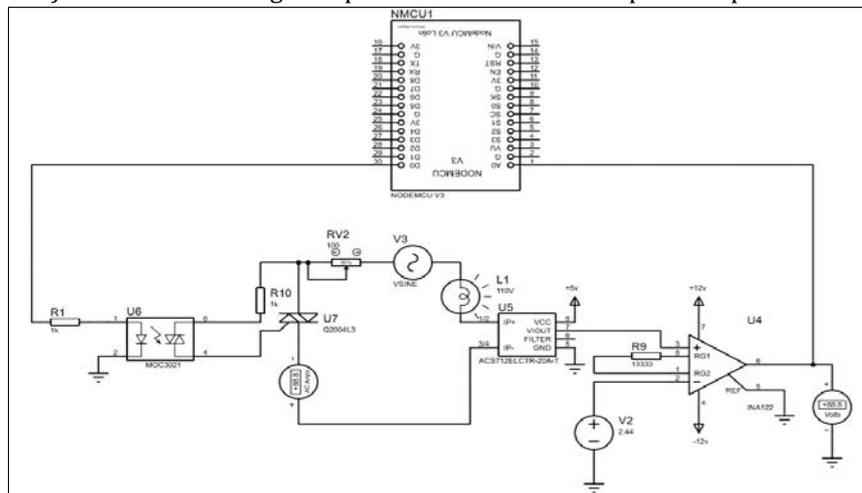


Figura 6. Circuito de control de consumo excesivo de corriente de la salida de voltaje alterno

En cuanto a la estructura, ya se encuentra totalmente construida y ensamblada (Figura 7) según una idea adaptada y acondicionada según los requerimientos del sistema. La estructura realizada responde también a las posibilidades de fabricación locales encontradas ya que no fue posible contar con ninguna otra empresa que acompañara la realización del proyecto con las necesidades particulares de la estructura planteada. Para la fabricación se contó con el apoyo de la empresa local Parasoles y Avisos – Adán García S.A.S., durante el proceso se realizaron diferentes reuniones para verificar el proceso de fabricación de los soportes, *enclosures* y estructuras de apoyo. Así mismo se recibió realimentación por parte de la empresa acerca de opciones, materiales y posibilidades técnicas que garanticen la operación continua y confiable del sistema en un ambiente exterior, en ese sentido fueron valiosos los aportes del personal de la empresa dada su experiencia con la fabricación de estructuras de diferente tamaño, características de montaje y complejidad.



Figura 7. Ensamble de la estructura de soporte del sistema (quiosco)

6. CONCLUSIONES

Se ha logrado construir una estructura física que albergue la totalidad del sistema solar fotovoltaico, de control, medición y comunicaciones que permita avanzar hacia la consolidación operativa concebida mediante la figura de un kiosco eco-amigable, que permita la recarga de energía de dispositivos electrónicos en ambientes urbanos, pero que también promueva actividades de interacción y concienciación social.

En el caso de monitoreo de variables relacionadas con la calidad del aire, luego de los análisis realizados y las pruebas realizadas con algunos sensores, se ha determinado que, dada la complejidad intrínseca de operación y de calibración de estos sensores, no es conveniente integrarlos al sistema ya que no es posible, dentro de los alcances del proyecto, garantizar datos fiables a los usuarios. En ese sentido solo se incorporará por ahora un sensor que sirva para la medición de material particulado.

La fabricación de estos kioscos, o módulos con diseños que tengan alto grado de detalle, no es fácil en el entorno local dado que los talleres o empresas que cuentan con las posibilidades para construirlos, consideran estos proyectos de prototipado como altamente demandantes en tiempo, personal y recursos y poco rentables desde el punto de vista económico, en ese sentido lo más aconsejable es tratar de adaptarse a opciones constructivas cercanas a la funcionalidad y con opciones de fabricación rápida.

En Colombia estamos en una época propicia para el desarrollo de proyectos que aprovechen la generación de energía eléctrica a partir del recurso solar mediante la tecnología fotovoltaica. Muchos años después que, en países más avanzados, finalmente, a nivel local, están dadas las condiciones en aspectos como mercado de componentes, regulación y normatividad, para avanzar hacia la popularización de la implementación de soluciones de pequeña, mediana y gran escala para contribuir con la diversidad energética nacional.

La energía solar fotovoltaica presenta algunas ventajas desde el punto de vista de factibilidad técnica que favorecen un mayor grado de penetración en el país que otras alternativas como la energía eólica, siendo esta última, por sus características de implementación y de la existencia del recurso, objeto de proyectos más focalizados en regiones específicas del territorio nacional.

La instalación en sitio, puesta en funcionamiento y pruebas con usuarios, entregará la información necesaria acerca de lo pertinente del diseño y de sus sistemas. Esta información también permitirá mejorar aspectos de funcionamiento y tomar previsiones acerca de aspectos o escenario de operación no contemplados.

Agradecimientos

Se agradece especialmente a los estudiantes Julián Andrés González Velásquez y Andrés David Ríos Mesa, miembros del semillero SCYDDE de la Facultad de Ingeniería, por su trabajo y valiosos aportes a este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Rosero, J. et al. (2013). Fuentes de generación de energía eléctrica convencional y renovable a nivel mundial. *Revista Politécnica*, 32(2), 1-13.
- [2] IDEAM-UPME. (2017). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Unidad de Planeación Minero Energética.
- [3] Rodríguez, H. (2009). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, 28, 83-89.
- [4] Meléndez, J. et al. (2017). Aspectos técnicos y regulatorios para la implementación de generación eléctrica fotovoltaica a nivel residencial en Colombia. En IX Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica. Bucaramanga, Colombia.
- [5] Pinilla, A. (2009). El poder del viento. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, 28, 64-69.
- [6] Revista Dinero. (2020). La portuguesa EDP cuenta detalles de los dos parques eólicos que construye en La Guajira. Recuperado: <https://www.dinero.com/empresas/articulo/energia-asi-van-los-dos-parques-eolicos-que-se-construyen-en-la-guajira/281002>.
- [7] Pozo, B. et al. (2019). Energy harvesting technologies and equivalent electronic structural ModELS – Review. *Electronics*, 8, 486.
- [8] Vallejo, M. y Galvis, L. (2010). La marcha humana como fuente generadora de energía a pequeña escala: Una revisión. *ITeckne*, 7(2), 184-190.
- [9] Forero, E., Gélvez, O. y Torres, C. (2018). Diseño de transductor piezoeléctrico para generación de potencia eléctrica. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 119-126.
- [10] Ruta n. (2014). Ahora los carros de Medellín generarán energía. Recuperado: <https://www.rutanmedellin.org/es/actualidad/noticias/item/treevolt-sensores-que-generan-energia-5>.
- [11] IDEAM. (2020). Irradiación global horizontal media diaria. Recuperado: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
- [12] Txes.org. (2015). Basics of a Solar Electric System. Recuperado: <https://txses.org/wp-content/uploads/2015/11/Basics-of-a-PV-System>.
- [13] Volker Quaschnig. (2004). Photovoltaic Systems: Technology Fundamentals. Recuperado: <https://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals3/index.php>
- [14] Solartex. (2020). Descripción Batería LiFePO4. Recuperado: <https://www.solartex.co/tienda/producto/bateria-lifepo4-12-8v-150a-smart-victron-energy>.
- [15] EPM. (2020). Solución solar integral para hogares y empresas. Recuperado: https://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/clientes-y-usuarios/nuestros-servicios/energia/solucion-solar-integral-para-hogares-y-empresas.
- [16] Chang, C., Narayana, S. y Buyya, R. (2019). Internet of Things and New Computing Paradigms. En Buyya, R. y Narayana S. (Eds.), *Fog and Edge Computing: Principles and Paradigms* (pp.3-21). Wiley.
- [17] IEC.ch. (2014). Internet of Things: Wireless Sensor Networks. Recuperado: <https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-internetofthings-LR-en>.
- [18] LoRa Alliance. (2020). What is the LoRaWAN Specification. Recuperado: <https://lora-alliance.org/about-lorawan>.
- [19] Bluetooth. (2020). Learn about Bluetooth Radio Versions. Recuperado: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/radio-versions/>.
- [20] Sigfox build. (2018). What is Sigfox. Recuperado: <https://build.sigfox.com/sigfox>.
- [21] Nearfieldcommunication.org. (2020). About Near Field Communication. Recuperado: <http://nearfieldcommunication.org/about-nfc.html>
- [22] ETSI.org. (2020). Mobile Communications. Recuperado: <https://www.etsi.org/technologies/mobile>.
- [23] International Climate Initiative. (2015). Solarkiosk. Recuperado: https://www.international-climate-initiative.com/fileadmin/Dokumente/landingpages/sairec2015/150918_5_Solarkioskweb.pdf.
- [24] Buitrago, D. y Rubio, C. (2015). Diseño de un quiosco solar para recargar dispositivos electrónicos como alternativa de ahorro de consumo de energía en la Universidad Libre, sede Bosque Popular. Trabajo de grado. Universidad Libre.
- [25] Camelo, J. y Díaz, J. (2008). Diseño e implementación de un cargador solar para dispositivos portátiles. Trabajo de grado. Universidad de San Buenaventura, Bogotá.
- [26] Nguyen, N. y Vinh, K. (2015). Design and Simulation of a photovoltaic-based energy system for mobile device chargers at public place. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research*, 5(1), 111-118.

Ilustración aplicativa del Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis - Matching SMAA-M en el Sector Salud

Rafael Guillermo García Cáceres
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Colombia

En el presente capítulo se presenta una aplicación del Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis – Matching (SMAA-M), una técnica que, al igual que las versiones anteriores de SMAA, ha sido diseñada para entornos públicos de decisión. SMAA-M está específicamente destinada a apoyar la elección de una o más alternativas entre un conjunto finito de ellas, cuando esta decisión se basa en un modelo teórico o sistema de referencia. La versión introdujo la noción de rango de valor de las alternativas de decisión, un concepto matemático que permite modelar el sistema. El proceso de decisión es compatible con el grado de coincidencia entre los estados de entrada y salida del sistema. El presente trabajo presenta una ilustración de la técnica estudiando la forma de gobernanza que minimiza los costos de transacción de un escalón de la cadena de suministro en el sector salud de Bogotá, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis (SMAA) usan para la evaluación de criterios una función de utilidad, cuya forma es consensuada por los Tomadores de Decisiones (TD) y han sido desarrolladas para entornos públicos de decisión en los que los TD no están dispuestos a expresar sus opiniones a priori. Las diferentes versiones de SMAA disponibles actualmente típicamente operan calculando el conjunto de pesos favorables que respaldan cada alternativa de decisión, lo que, a su vez, permite obtener los indicadores de resultado de la técnica: índices de aceptabilidad, vectores de peso central y vectores de rango. En este contexto, la decisión entre las diferentes alternativas del sistema se basa en el análisis y la comparación de sus pesos factibles que las favorecen [1, 2].

Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis (SMAA) es la única técnica de la familia SMAA para abordar la solución de problemas que requieren un marco teórico para explicar una relación causa-efecto que no está definida por una expresión funcional explícita, ecuación o desigualdad. Las versiones anteriores de SMAA buscan tomar decisiones basadas en criterios que no requieren ningún soporte teórico, esto deja de lado los beneficios que los desarrollos teóricos o empíricos se han desarrollado por las diferentes disciplinas y los cuales son idóneos para soportar procesos de toma de decisiones.

SMAA-M enmarca su proceso matemático en un sistema teórico, para lo cual propone un mecanismo de contraste que permite determinar el nivel de coincidencia entre las condiciones iniciales y finales del sistema. Dependiendo de si las condiciones iniciales corresponden a este o aquel estado previamente identificado por el modelo, este último proporciona una recomendación cargada de teoría. La técnica busca evaluar las alternativas a través del sistema, utilizando los criterios que sugiere. La coincidencia entre las condiciones de entrada y las diferentes opciones de salida, que SMAA-M evalúa matemáticamente, indica la conveniencia de las alternativas, dependiendo de la configuración proporcionada por los TM en un entorno público.

El mecanismo de contraste propuesto por la nueva versión de SMAA-M implicó cambios que hacen que la matemática de la técnica también difiera significativamente de la de sus predecesoras. SMAA-M basa sus decisiones en las diferentes combinaciones válidas establecidas para cada estado de entrada y su estado de salida correspondiente, que en realidad son coincidencias determinadas por el sistema. Por estos motivos, el método permite tomar decisiones, una para cada estado de entrada. Cada una de estas decisiones está respaldada por el espacio factible que favorece su unidad de decisión correspondiente, es decir, la coincidencia entre los estados de entrada y salida del sistema.

A la luz de un modelo teórico específico para cada caso, el sistema se interpreta a través de la evaluación de una serie de criterios descriptivos que permiten comparar los estados de entrada y salida que constituyen cada alternativa de decisión. Para resolver el problema de decisión, SMAA-M introduce el concepto de Rango de valor (RV), que vincula el modelo teórico con el proceso de toma de decisiones. Un RV es un segmento lineal acotado cuya longitud, junto con su alternativa asociada, define el espacio factible. En este contexto, cada RV es un continuo, discretamente separado del resto por dos límites. Es importante mencionar que, dependiendo del sistema estudiado, las alternativas pueden tener la misma naturaleza o pueden ser esencialmente diferentes. Para ilustrar esta noción a continuación, se presenta un ejemplo en cada caso:

Las condiciones del sistema de entrada son de la misma naturaleza que las del sistema de salida. Este es el caso de la teoría de los costos de transacción, que establece que cada forma de gobernanza de un sistema dado es adecuada para un régimen de costos de transacción diferente. A su vez, dicho régimen está determinado por variaciones en una serie de dimensiones de costos de transacción que, para este caso de estudio, corresponden a la Dificultad de Evaluación de Flujo de Suministro y Especificidad de Activos. Cuanto mayor sean los costos de transacción, menor será la forma de gobernanza que permita las transacciones de mercado abierto, lo que conducirá a la implementación de alianzas estratégicas o enfoques de integración vertical. Por lo tanto, las formas de gobernanza van desde relaciones de

mercado (aplicadas a bajos costos de transacción) a través de alianzas estratégicas hasta integración vertical (aplicadas a altos costos de transacción). En este caso, los estados de entrada y salida del sistema son de la misma naturaleza, ya que ambos son formas de gobernanza: el estado de entrada corresponde a la forma de gobernanza actual, mientras que el estado de salida corresponde a la forma de gobernanza teóricamente apropiada que idealmente debería ser implementado de acuerdo con la teoría de los costos de transacción [3].

SMAA-M utiliza la serie RV para explorar el espacio de peso factible que aTDite cada alternativa, apoyando así el proceso de toma de decisiones. Los vectores de peso factibles representan diferentes valoraciones posibles aportadas por los tomadores de decisiones. Una función compara los valores de criterio con el RV de cada alternativa, que representa una característica general utilizada para evaluar la alternativa. El espacio favorable de una alternativa corresponde al conjunto de pesos que hace que la RV sea factible en la realidad teórica de esa alternativa. En resumen, SMAA-M explora el espacio de pesos factibles que soporta la realidad virtual de cada alternativa, de tal manera que el volumen de esos pesos representa el grado de coincidencia entre la alternativa en cuestión y el sistema.

Las entradas de SMAA-M son valores de criterio, funciones de mapeo y cotas características de RV, este último constituye un requisito adicional con respecto a las versiones anteriores de SMAA. Por otro lado, los indicadores de salida son los mismos en la nueva técnica: índices de aceptabilidad, pesos centrales y cotas de los pesos de los criterios que soportan y hacen dominante a la alternativa.

El SMAA-M es un trabajo que tiene como contribuciones centrales: 1) la introducción de un nuevo paradigma de decisión para ser utilizado en las técnicas MCTD, basado en un modelo teórico o sistema de referencia y no solo en un conjunto relevante de criterios; y 2) el desarrollo de este paradigma en el contexto de SMAA, dando lugar a SMAA-M. Este trabajo ilustra el método con una aplicación de las ciencias económicas, específicamente la teoría de los costos de transacción [3] para facilitar la gestión de la cadena de abastecimiento. Al respecto, la ATDinistración de la Cadena de Suministro es la coordinación sistemática y estratégica de las funciones tradicionales del negocio y de las tácticas a través de estas funciones empresariales dentro de una compañía en particular, y a través de las empresas que participan en la cadena de abastecimiento con el fin de mejorar el desempeño a largo plazo de las empresas individuales y de la cadena de abastecimiento como un todo [4] Específicamente, la aplicación consiste en determinar cuál es la forma de gobernanza que minimiza los costos de transacción de un escalón de la cadena de abastecimiento de medicamentos de Bogotá. El trabajo se organiza en una revisión de la literatura, el desarrollo de la aplicación de SMAA-M, resultados, conclusiones y recomendaciones y perspectivas de la investigación.

2. MARCO REFERENCIAL

Ayudar al proceso de toma de decisiones por medio de métodos multicriterio que buscan la selección de una o más alternativas de un conjunto de ellas, principalmente mediante la evaluación de la información preferencial suministrada por los TD [5, 6]. Sin embargo, pueden surgir problemas en entornos particulares de toma de decisiones cuando los responsables de tomar decisiones no quieren o no pueden expresar sus preferencias explícitamente. Para resolver este problema, Charnetski y Soland [7] propusieron lo que se ha reconocido recientemente como el primer paso hacia SMAA, ya que los posteriores desarrolladores del método SMAA simplemente no estuvieron al tanto de este documento en su momento. Bana e Costa [8, 9] introdujo un procedimiento cuyos indicadores sugieren la aceptabilidad de una alternativa cuando la decisión se basa en tres variables. Posteriormente, el método se ha desarrollado aún más de varias maneras. Al principio, lo generalizaron a un espacio multidimensional [10, 11] y, luego, dependiendo de la naturaleza de la matriz de valores de preferencia, se desarrollaron mecanismos de procesamiento de datos más sofisticados. Entre ellos podemos contar diferentes versiones de SMAA para datos imprecisos [12] y valores de datos estocásticos [10, 11]. A su vez, SMAA-O se aplica a valores de datos tanto cardinales como ordinales y también es capaz de tratar información faltante e imprecisa [13].

Una revisión reciente de la evolución de SMAA [15] aborda los desarrollos teóricos y aplicados de esta técnica. Las diferentes versiones del método generalmente difieren de dos maneras: 1) Versiones SMAA *puras* que buscan manejar diferentes tipos de información; y 2) versiones *híbridas*, que combinan la técnica con otras técnicas que provienen de los ámbitos de la teoría de la decisión o la investigación operativa. Sin embargo, ninguna de las versiones publicadas anteriormente de SMAA ha demostrado ser útil para ayudar al contexto de toma de decisiones abordado en este artículo, lo que llevó al desarrollo de SMAA-M, que es especialmente útil para resolver nuestra problemática.

Enmarcado en la revisión de la literatura actual, SMAA-M es una técnica pionera Multi Criteria Decision Making (MCDM) entre los empleados para resolver el tipo de problema descrito anteriormente, que, por otro lado, se ha abordado en gran medida a través de estadísticas multivariadas. Sin embargo, este último no es rival de SMAA-M, ya que no utiliza las mismas herramientas matemáticas ni establece el mismo enfoque concluyente. En este sentido, SMAA-M se convierte en un complemento de técnicas estadísticas, que generalmente llevan a cabo el proceso de prueba de hipótesis a través de datos muestreados. Por el contrario, SMAA-M adopta un enfoque basado en la teoría para la solución de los problemas en cuestión, apoyado en el grado de coincidencia empírica de la gestión actual respecto a lo que debe ser, forma de gobernanza sugerida por la teoría de costos de transacción.

3. MÉTODO

La metodología es implícita al SMAA-M, esta consta de cuatro etapas: conceptualización del problema e identificación del modelo teórico que es capaz de resolverlo; adaptación del modelo teórico a la estructura matemática de la técnica; recopilación de información; y ejecución computacional y toma de decisiones. Estos pasos se detallan a continuación:

1. Identificación del objeto de estudio y los antecedentes teóricos del problema de decisión enmarcado en el contexto SMAA-M aceptado conjuntamente por los TD. Este antecedente teórico es el sistema de referencia real que permite resolver total o parcialmente el problema planteado por el objeto de estudio.
2. Caracterización matemática de la aplicación específica de SMAAM al caso. En esta etapa, es necesario: 1) identificar el conjunto de Rir asociado a las alternativas teóricas del sistema de decisión, y 2) relacionarlos con los conjuntos e índices de SMAA-M de acuerdo con el sistema de referencia seleccionado.
3. Obtención de la información de entrada de SMAA-M. En esta etapa, es necesario: 1) Diagnosticar el contexto de decisión actual, 2) obtener la matriz de valor de Criterio de cada RV, 3) obtener la matriz de rango característico y seleccionar una forma para que los TD definan conjuntamente la matriz funciones de utilidad de SMAA-M.
4. Ejecución de SMAA-M, que da como resultado los datos de salida, que se presentan a los TD.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Identificación del objeto de estudio y el sistema teórico que enmarca el problema de decisión en el contexto SMAA-M aceptado conjuntamente por los TD

Como parte del presente trabajo, SMAA-M se aplicó a un estudio de caso. El objeto de estudio estuvo relacionado con un escalón de la cadena de suministro del sector salud de la ciudad de Bogotá, Colombia. Las compañías que operan este escalón son las EPS (compañías promotoras de atención médica), que son las aseguradoras, y las IPS (proveedores de atención médica), que corresponden a los hospitales y clínicas que brindan el servicio de salud. El estudio de esta cadena de suministro en particular se consideró pertinente debido a la evidencia empírica que revela los altos costos de transacción en este escalón. Se eligieron tres consideraciones comerciales para limitar el estudio de caso: medicamentos no subsidiados, compañías de capital nacional y compañías que manejan los siguientes tres tipos de medicamentos recetados genéricos: analgésicos, antibióticos y medicamentos cardiovasculares.

Los agentes económicos de una cadena de suministro interactúan a través de diversas formas de gobernanza que generan costos de transacción. Mientras que la forma de gobernanza se define como el marco institucional en el que se respaldan los contratos [16], los costos de transacción pueden definirse como los resultantes del funcionamiento del sistema económico. Por tal motivo, no generan valor agregado y no pueden cuantificarse fácilmente [17]. De acuerdo con la Teoría de los Costos de Transacción [3] y con el trabajo complementario sobre el tema [18-21], las empresas deberían decidir cuál es su forma de gobernanza más eficiente para reducir los costos de transacción. A pesar de su importancia económica, la investigación empírica sobre los costos de transacción de la cadena de suministro sigue siendo incipiente [22]. El trabajo en este campo se ha limitado principalmente al uso de análisis estadísticos multivariados como técnica matemática típica de soporte de decisiones para este tipo de casos.

Como se explicó previamente se ha aplicado la técnica a un eslabón de la cadena de suministro, que se tratará en detalle más adelante, cuyas posibles formas de gobernanza (alternativas: integración vertical, alianza estratégica y relación de mercado) se evalúan por un modelo basado en la teoría de costos de transacción en términos de los diferentes regímenes de costos que implican para la cadena. En este caso, los estados de entrada y salida del sistema son de la misma naturaleza, a saber, las formas de gobernanza. Los estados de entrada son las formas de gobernanza actuales del escalón logístico, mientras que los estados de salida son las formas de gobernanza potenciales que, en teoría, podrían ser adoptadas por el escalón logístico. Por lo tanto, cada alternativa es una combinación de formas de gobernanza actuales y potenciales.

SMAA-M expresa cada alternativa como un RV normalizado. A su vez, los TD describen los regímenes de costos de transacción emprendidos por las empresas en este escalón de la cadena de suministro en términos de sus dimensiones de transacción, que son los criterios de decisión reales. Esta información es procesada por SMAA-M para identificar el *statu quo* de los vínculos entre empresas (si toleran costos de transacción más altos o más bajos), en función de los cuales asigna lo que el modelo considera como la mejor forma probable de gobernanza para cada caso. En el caso de estudio, se desarrolla una encuesta que contiene una serie de preguntas dirigidas a parámetros organizacionales que, a su vez, están relacionadas con las dimensiones de costo de transacción descritas del modelo económico. Las respuestas a estas preguntas se procesaron como valores, promedios aritméticos, correspondientes a los valores de criterio reales (actuales). El cuestionario se responde mediante una escala Likert que califica los parámetros en

cuestión. De esta manera, la normalización de la puntuación asignada por los TD a cada parámetro lo coloca dentro de la realidad virtual de una u otra alternativa. Dicho emparejamiento indica que, según la teoría, la situación que experimenta el sistema se resuelve mejor con la(s) alternativa(s) preferida(s), hacia la cual la decisión debería inclinarse idealmente. En el ejemplo, determinar para las empresas del escalón si están siendo eficientes en su intercambio económico. Para ello hay que determinar si existe correspondencia entre los regímenes de costos de transacción en los dos grupos de empresas del escalón de la cadena de suministro dado con el(los) de uno o más formas de gobernanza alternativa, para ello se determina la probabilidad de que este último proporcione una mejor administración de costos de transacción que la relación de gobernanza actuales, en el caso de que estas opciones no resulten favorecidas por la teoría de costos de transacción.

Vale la pena mencionar que las alternativas en SMAA-M no se excluyen mutuamente porque el modelo conceptual podría sugerir la elección de una o más alternativas al mismo tiempo. Esto, junto con el hecho de que la decisión debe ser asistida por el modelo, hace que sea inadecuado recurrir al típico concepto de *ranking* de SMAA.

El modelo conceptual que se muestra en la Tabla 1, que vincula las dimensiones de la transacción (criterios) con la forma de gobernanza (alternativa) que mejor reduce dichos costos, es soportado por la teoría de los costos de transacción.

Tabla 1. Modelo de costos de transacción según dimensiones [3, 19]

Formas de Gobernanza	Criterio: Especificidad del Activo	Dificultad de Evaluación
Empresas	Alto	Alto
Alianzas	Medio	Medio
Mercados	Bajo	Bajo

4.2 Caracterización matemática de la aplicación específica de SMAA-M al caso de estudio

Los TD describieron el *statu quo* de las formas de gobernanza de las empresas en el escalón de la cadena de suministro estudiada en términos de dos dimensiones (criterios) de costos de transacción: características específicas de los recursos físicos, aquí denominados Especificidad de activos ($j = 1$); y dificultades para evaluar el flujo de suministro (Dificultad de evaluación ($j = 2$)).

El modelo conceptual establece cinco relaciones económicas, alternativas, o formas de gobernanza para el sistema estudiado: mercado a corto plazo ($r = 1$), que es una relación económica esporádica; mercado a mediano plazo ($r = 2$), una relación económica estable; mercado a largo plazo ($r = 3$), una relación económica estable que comparte planes a largo plazo; alianza estratégica ($r = 4$); e integración vertical ($r = 5$).

Para obtener la información, se contempló el número de categorías y su correspondencia con los límites de RV en una encuesta diseñada para el caso. En él, se usaron tablas Likert continuas que van desde 1 (que expresa conformidad total) hasta 5 (objeción total), en cada pregunta, para evaluar los valores de criterio asociados a cada una de las formas de gobernanza actuales, en el momento del estudio.

4.3 Obtención de la información de entrada de SMAA-M

La Tabla 2 muestra el porcentaje de distribución de las formas de gobernanza actualmente operando entre las empresas del escalón de la cadena de abastecimiento que realizan el intercambio económico. Las formas actuales de gobernanza del escalón son Mercado a largo plazo (etiquetado como $i = 3$ en la tabla) e Integración vertical (etiquetado como $i = 5$). Las cinco formas de gobernanza teóricas sugeridas por el sistema de referencia son los estados de salida (r , etiquetados del 1 al 5), expuestos en la tabla. Además, para aprovechar la estructura de la encuesta, cada positivo $\varepsilon \rightarrow 0$.

Tabla 2. Relaciones comerciales dentro de la cadena de suministro

Enlace	Gobernanza teórico forma mercado a corto plazo $r = 1$	Mercado a medio plazo $r = 2$	Mercado a largo plazo $r = 3$	Alianzas estratégicas $r = 4$	Integración vertical $r = 5$
Formas de gobernanza actuales	NA	NA	$i = 3$	NA	$i = 5$
Proveedores de servicios de salud - Compañías de seguros de salud	0	0	67.16%	0	32.84%

Los promedios de los valores de criterio utilizados por los TD para describir los regímenes de costos de transacción que presentan las formas de gobernanza actuales en el momento del estudio se muestran en la Tabla 3. Estos valores fueron validados por los TD para la presente investigación y, por lo tanto, se utilizaron como entrada para SMAA-M.

Tabla 3. Valores de criterio deterministas para cada alternativa

v_{ij}	i	j	1	2
3		4.160	4.050	
5		2.200	3.394	

En un entorno de decisión que hace uso directo de la teoría de la utilidad, la forma de gobernanza 3 sería dominante (tiene una utilidad más alta), ya que se puede deducir fácilmente de la tabla anterior. En el presente caso, sin embargo, el proceso de toma de decisiones no es directo y, en consecuencia, más complejo. En este proceso, tanto los valores característicos de criterio como los límites característicos de RV se asignan al rango [0,1]. Se ha considerado que los límites de RV tienen la misma longitud (como se muestra en Tabla 4). A su vez, las funciones de utilidad parcial $f()$ y $h()$ fueron definidas por los TD como de naturaleza uniforme $U(0, 1)$, tal como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Límites de referencia RV y límites característicos RV

(y_{ir}, x_{ir})		1	2	3	4	5
i	r					
3	[0, 1]	(1, 2]	(2, 3]	(3, 4]	(4, 5]	
5	[0, 1]	(1, 2]	(2, 3]	(3, 4]	(4, 5]	
	(l_{ir}, u_{ir})					
3	[0, 1/5]	(1/5, 2/5]	(2/5, 3/5]	(3/5, 4/5]	(4/5, 1]	
5	[0, 1/5]	(1/5, 2/5]	(2/5, 3/5]	(3/5, 4/5]	(4/5, 1]	

4.4 Ejecución de SMAA-M, resultando en datos de salida presentados a los TD

Para cada forma de gobernanza actual, se determinó la forma de gobernanza teórico óptimo, en términos de minimización de costos de transacción, de acuerdo con su índice de aceptabilidad, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Índices de aceptabilidad

a_{ir}	i	r	1	2	3	4	5
3		0	1	0	0	0	0
5		0	0	0.6583	0.3417	0	0

Como resultado del análisis, se puede ver que la forma de gobernanza actual 3 ($i = 3$) no es compatible con el análisis, ya que la forma teórica de gobernanza 2 ($r = 2$) parece ser muy fuerte. Aquí se puede deducir que los TD mantienen una postura conservadora que favorece las relaciones de mercado a largo plazo sobre las de mediano plazo, aunque esta no se considera la relación comercial óptima para las empresas que implementan dicha forma de gobernanza (ver Tabla 2). Del mismo modo, la forma de gobernanza actual 5 ($i = 5$) no está respaldada por el análisis, que sugiere relaciones de mercado a largo plazo ($r = 3$) y alianzas estratégicas ($r = 4$). La razón de esta preferencia podría ser la desconfianza aparentemente arraigada pero no realmente justificable hacia relaciones menos jerárquicas.

En conclusión, este escalón de la cadena de suministro favorece las relaciones comerciales cercanas con el socio comercial, con ligeras variaciones según el tipo de empresa y la materia prima que comercializan.

Por otro lado, como se puede observar en Tabla 6, los pesos centrales coinciden con los índices de aceptabilidad. La valoración del criterio proporcionada por los TD cuyas compañías operaron bajo relaciones de mercado a largo plazo solo respalda la forma teórica de gobernanza 2. Esta es la razón por la cual los pesos centrales son 0.5 para ambos criterios. Para analizar la forma de gobernanza actual 5 ($i = 5$), los pesos centrales que respaldan la forma de gobernanza teórico 4 ($r = 4$) deben ser altos (0.8283) para la especificidad de activos ($j = 1$) y bajos (0.1717) para la Dificultad de evaluación de la relación económica ($j = 2$). En este caso, los TD consideraron que los costos de transacción resultan de las cuasi rentas compuestas involucradas en las relaciones comerciales, más que de la imprevisibilidad del funcionamiento del mercado. Una situación más equilibrada se muestra en la forma de gobernanza actual 3 ($i = 3$), que registra pesos centrales de 0.3288 y 0.6712 para la especificidad de activos y la dificultad de evaluación, respectivamente.

Tabla 6. Pesos centrales

	$J = 1$	$J = 2$
W_{cir}	0.5	0.5
W_{c32}	0.3288	
W_{c3}	0.6712	

Las cotas de los vectores de pesos de los criterios que soportan cada R_i^r se presentan en la Tabla 7. Los resultados se ajustan a la idoneidad de los indicadores anteriores, por lo que en el caso de la forma de gobernanza actual 3, no se encontraron ponderaciones de criterios que respalden las formas de gobernanza teórica 1, 3, 4 y 5 porque los criterios en cuestión solo respaldaron la forma de gobernanza teórica 2. Se puede llevar a cabo un análisis similar para la forma de gobernanza actual 5.

Tabla 7. Cotas del vector de pesos

Max (Min) _j {w _{ij} ^r }						
w _{ij}	w _{3 2}		w _{5 3}		w _{5 4}	
J	1	2	1	2	1	2
Max _j = 1	1	0	0.66	0.34	1	0
Min _j = 1	0	1	0	0	0.67	0.33
Max _j = 2	0	1	0	0	0.67	0.33
Min _j = 2	1	0	0.66	0.34	1	0

5. CONCLUSIONES

Para cada sistema estudiado, SMAA-M busca determinar el conjunto de pesos favorables que respaldan cada alternativa considerada pertinente para ser analizada por los TD. La forma en que se concibió la técnica permite su uso cuando los criterios de decisión están relacionados con escalas de valor continuas, siempre que los TD proporcionen el modelo conceptual que permita analizar los RV. SMAA-M evalúa el grado de coincidencia entre el sistema y sus alternativas. En la versión actual, se sugieren reglas generales para simplificar el análisis.

Se puede proyectar un nuevo progreso de la técnica en varios aspectos:

1. En la presente versión de SMAA-M, la información de entrada es de naturaleza determinista. Por lo tanto, es necesario que otros tipos de datos (por ejemplo, estocástico u ordinal) sean involucrados en la técnica.
2. Buscar la relación entre SMAA-M y la familia de técnicas SMAA, otras técnicas MCTD y técnicas estadísticas multivariadas.
3. Nuevas aplicaciones prácticas de SMAA-M, en el sentido de, por ejemplo, la identificación y el uso de nuevos modelos teóricos que pueden ser tratados por la técnica para apoyar procesos de decisión en diferentes campos científicos.
4. Desarrollo de nuevos indicadores SMAA-M.
5. Se proporciona una perspectiva prometedora mediante la inclusión de SMAA-M en el Método de Análisis Integral (IAM) [14] o como complemento de la lógica difusa [23, 24], cuando se trata de tratar problemas de decisión en contextos de optimización.

Mediante un estudio de caso, se ha presentado una aplicación práctica de SMAA-M: el análisis de costos de transacción de la gestión de un escalón de una cadena de suministro. Según lo declarado por Grover y Malhotra [22] y Torres et al. [25, 26] la teoría de los costos de transacción tiene un potencial de investigación invaluable. No obstante, las implicaciones prácticas y teóricas de la aplicación actual todavía están bajo evaluación. Por tal motivo, todavía no se puede apreciar completamente su impacto. Finalmente, es necesario desarrollar nuevos paquetes de software para admitir nuevas aplicaciones SMAA [27].

REFERENCIAS

- [1] Lahdelma, R. y Salminen, P. (2010). Stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). *Operation research*, 49(3), 325-368.
- [2] Tervonen, T. y Figueira, J. (2008). A survey on stochastic multicriteria acceptability analysis methods. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 15, 1-14.
- [3] Coase, R. (1937). The nature of the firm. *Journal Economica*, 4(16), 386-405.
- [4] Mentzer, J. et al. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1-25.
- [5] Herrmann, N. (1991). The Creative Brain. *Journal Creative Behavior*, 25(4), 275-95.
- [6] Keeney, R. y Raiffa, H. (1976). *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. Wiley.
- [7] Vincke, P. (1992). *Multicriteria decision - Aid*. Wiley.
- [8] Charnetski, J. y Soland, R. (1978). Multiple-attribute decision making with partial information: The comparative hypervolume criterion. *Naval Research Logistics Quarterly*, 25(2), 279-288.
- [9] Bana, E. y Costa, C. (1986). A multicriteria decision aid methodology to deal with conflicting situations on the weights. *European Journal of Operational Research*, 26(1), 22-34.

- [10] Bana, E. y Costa, C. (1988). A methodology for sensitivity analysis in three-criterion problems: A case study in municipal management. *European Journal of Operational Research*, 33(2), 159–73.
- [11] Lahdelma, R., Hokkanen, J. y Salminen, P. (1998). SMAA - Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis. *European Journal of Operational Research*, 106(1), 137–143.
- [12] Lahdelma, R. y Salminen, P. (2001). SMAA- 2: Stochastic multicriteria acceptability analysis for group decision making. *Operations Research*, 49(3), 444–54.
- [13] Miettinen, K. y Salminen, P. (1999). Decision – Aid For Discrete Multiple Criteria Decision making problems with imprecise data. *European Journal of Operational Research*, 119(1), 50–60.
- [14] Lahdelma, R., Miettinen, K. y Salminen, P. (2003). Ordinal criteria in stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). *European Journal of Operational Research*, 147(1), 117–127.
- [15] García, R. Aráoz, J. y Palacios, F. (2009). The integral analysis method (IAM). *European Journal of Operational Research*, 192(3), 891–903.
- [16] Pelissari, R. et al. (2019). SMAA methods and their applications: A literature review and future research directions. *Annals of Operations Research*, 1, 45–61.
- [17] Palay, T. (1984). Comparative institutional economics: the governance of rail Freight contracting. *The Journal of Legal Studies*, 13(2), 265–288.
- [18] Arrow, K. (1972). Economic welfare and the allocation of resources for invention. In Rowley C. (Ed.), *Readings in industrial economics*, (pp. 219–236). Wiley.
- [19] Williamson, O. (1975). *Markets and hierarchies, analysis and antitrust implications*. The Free Press.
- [20] Williamson, O. (1985). *The economic institutions of capitalism*. The Free Press.
- [21] Williamson, O. (1991). Comparative economic organization: the analysis of discrete structural alternatives. *Administrative Science Quarterly*, 36, 269–96.
- [22] Williamson, O. (1993). Calculativeness, trust and economic organization. *The Journal of Law and Economics*, 36(1), 453–86.
- [23] Grover, V. y Malhotra, M. (2003). Transaction cost framework in operations and supply chain management research – Theory and measurement. *Journal of Operations Management*, 21(4), 457–73.
- [24] Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Journal Information and Control*, 8(3), 338–53.
- [25] Nagarajan, D. et al. (2019). A new perspective on traffic control management using triangular interval type-2 fuzzy sets and interval neutrosophic sets. *Operations Research Perspectives* 6, 1–13.
- [26] Torres, S., García, R. y Quintero, J. (2005). Formas de contratación de los servicios de urgencias: una aproximación desde la economía de los costos de transacción. *Revista de Economía Institucional*, 7(12), 209–237.
- [27] Torres, S., García, R. y Quintero, J. (2007) Costos de transacción en los servicios de consulta externa: El caso de los hospitales de tercer nivel en Bogotá, Colombia. *Cuadernos de Economía – Latin American Journal of Economics*, 44, 33–262.

Caracterización de métodos de evaluación ergonómica y antropométrica en trabajadores del sector metalmeccánico

Lyda Viviana Gómez Merchán¹

Diana Karina López Carreño²

Leider Alexandra Vásquez Ochoa³

¹Universidad Nacional de Colombia

²Universidad Distrital

³Universidad de Cundinamarca
Colombia

A partir de la necesidad de evaluar los riesgos físicos de tipo ocupacional a los cuales se encuentran expuestos los trabajadores del sector metalmeccánico en el municipio de Soacha por el accionar de herramientas de golpe, se plantea integrar a los métodos de evaluación tradicionales (métodos Occupational Repetitive Action OCRA, y Rapid Upper Limb Assessment RULA) el uso de un sistema electrónico de captura de datos (Cálculos a partir de sensores de movimiento y fuerza) caracterizado por el registro de micro eventos imperceptibles con los métodos de observación directa, centrando el estudio en las extremidades superiores toda vez que la fisiología articular de la mano refiere movimientos de rotación (pronosupinación) dinámica como signo de repetitividad y que requieren ser evaluados al detalle en contraste con los esfuerzos mecánicos producto de la actividad de acuerdo a los aspectos demográficos y antropométricos de la población objeto de estudio permitiendo la integración de la variable temporal. Es así que los resultados de la investigación se consolidaran como una fuente de información importante en los sistemas de control epidemiológico por evidenciar la influencia de las tareas de la actividad en la preservación de la salud del trabajador toda vez que integra el desarrollo tecnológico e innovación en procesos de identificación y evaluación de riesgos musculo-esqueléticos, con un enfoque de documentación sistemática sobre el sector metalmeccánico de municipio de Soacha Cundinamarca.

1. INTRODUCCIÓN

Para el primer trimestre del año 2017 el PIB colombiano creció un 1.1% registrando variaciones significativas por actividades económicas asociadas con la industria manufacturera [1] que incluye la producción metalmeccánica clasificada industrialmente de acuerdo al código 259 (CIU Rev4) por la elaboración de otros productos elaborados de metal y en relación con el trabajo de metales [2] para abastecer las industrias manufactureras mediante la elaboración de una amplia gama de productos y servicios indispensables para el desarrollo de la sociedad [3], que visto a nivel operacional se puede destacar que en promedio una organización del tipo emplea 30 trabajadores de manera permanente y 12 temporales [2] para la operación de diferentes subprocesos y técnicas productivas de complejidad, provistas por un *árbol de componentes* que liga múltiples piezas, sub-montajes y productos [4], con el uso de maquinarias, equipos y herramientas que predisponen a nivel laboral [5] un riesgo medio para el trabajador [6] representados en un 46.25% por factores ergonómicos y en menor proporción por factores químicos, de seguridad, físicos y psicosociales (dados en orden de exposición) [7]. A nivel ergonómico se evidencia el riesgo por exposición a puestos de trabajo que exigen movimientos repetitivos y posturas inadecuadas [8], esfuerzo físico, trabajo de pie [9] que favorecen la aparición de lesiones musculo esqueléticas causando ausentismo laboral y reducción de la productividad [8].

Así mismo la importancia económica del sector constituye una fuente de oportunidades laborales para la población de Soacha por cuanto el 11% de las unidades productivas del municipio corresponden al sector industrial [10], registrando una concentración del 67.6% de los activos operacionales del municipio y la generación del 45% de los empleos de la provincia destacando que para el año 2010 solo el 9% de esta población registran realizar aportes a una Administradora de Riesgos Laborales (ARL), encontrando a su vez que el 97% de las empresas registradas en la provincia son microempresas [11] por cuanto dada la importancia del sector en el municipio y las características operacionales del emplazamiento del personal se evidencia la necesidad de identificar y valorar los niveles de riesgo ergonómico al que se encuentra expuesto este sector de la población, ya que las prácticas requieren de la aplicación de una fuerza manual excesiva que puede afectar la naturaleza de las articulaciones de los miembros superiores y demás estructuras corporales [12].

Es así que denotando la necesidad de valorar la ejecución de las tareas para su contraste con límites físicos y biomecánicos de conformidad con los aspectos antropométricos, se evidencia mediante los métodos de evaluación de carga física y movimientos repetitivos como son RULA y OCRA respectivamente, entendiendo la predisposición a desordenes musculo-esqueléticos que por carga física en el ambiente de trabajo valorando el grado de exposición del trabajador al riesgo por la adopción de posturas inadecuadas considerando factores como las fuerzas ejercidas o la repetitividad [13], para su medición, análisis e interpretación en el sector productivo se emplean métodos observacionales, para luego proceder con un análisis técnico de los hallazgos, teniendo como limitaciones la valoración a partir de consideraciones hipotéticas de investigadores formados de quienes se asume *el sesgo del evaluador* [14], con lo que no se realiza un análisis exhaustivo que ponga en consideración el tiempo de trabajo [15] y por último la desventaja más relevante para la aplicación de los métodos es la gran variabilidad inter e intra observacional [16].

2. MARCO TEÓRICO

Los factores de riesgos de trastorno musculoesqueléticos en extremidades superiores están sujetos a la intensidad, frecuencia y duración del movimiento de actividades laborales por posturas, fuerza y movimientos repetitivos [17], debido al trabajo dinámico de los miembros superiores; según el estudio de factores de riesgo de trastornos musculoesqueléticos crónicos laborales se efectuó la evaluación del método RULA y el cuestionario nórdico estandarizado fue aplicado a más de 100 trabajadores y la población no presenta lesiones de gravedad, sin embargo las extremidades superiores más afectadas fueron: mano-muñeca derecha (65,5%), espalda (62,2%) y mano-muñeca izquierda (44,2%). El 87% de la población trabajadora se auto medica con antiinflamatorios para el dolor, de un grado moderado a fuerte, persistente durante 1 a 24 horas [17].

Algunas Lesiones Osteomusculares de Miembro Superior (LOMS) se definen en indicios de irritación del tendón en los músculos del antebrazo (epicondilitis), síndrome del túnel del carpio (Irritación del nervio mediano del dedo índice y mitad del dedo anular) [18], tendinitis de muñeca en la que los desórdenes de extremidades superiores, la repetición de movimiento, sobreesfuerzo y vibración son factores relacionados en la que se ha establecido que el ausentismo laboral debido a las LOMS es de 24,2% por síndrome de túnel del carpo y un 10,65% por tendinopatías [19].

De acuerdo a la investigación realizada en Cartagena-Colombia sobre análisis de riesgos ocupacionales en sector metalmeccánico se determinó que la falta de compromiso por parte de los trabajadores en el uso de elementos de protección individual, en la que el 87,5% manifestaron incomodidad y deciden no usarlos para realizar las actividades, el deterioro de herramientas con un 37,5% y con un 25% el levantamiento de cargas superiores es decir uso de las extremidades superiores que se convierten en causas de accidentes laborales; con respecto a los agentes químicos a los que están expuestos los trabajadores del sector metalmeccánico, 43,75% está expuesto a inhalación de polvo metálico y 31,25% a la inhalación de material particulado [7].

Los elementos que se consideran y aportan al riesgo en el sector metalmeccánico son el acoplamiento mano objeto en la que se suma las restricciones posturales, superficie de trabajo y factores ambientales, en la que se debe priorizar el enfoque preventivo y la variable región vertical (distancia vertical – posiciones altas o bajas de manipulación) [20]. en el caso metalmeccánica se enfatizan como elementos específicos que generan mayor riesgo a este tipo de actividad: distancia horizontal, flexión y movimientos laterales del tronco; de acuerdo a las investigaciones realizadas sobre las *condiciones de trabajo de la industria manufacturera relacionada a los trastornos musculoesqueléticos y dorso lumbar para plantear estrategias y recomendaciones de autocuidado en el sector metalmeccánico* se analizó una muestra de 43 empresas del sector metalmeccánico, de alimentos y una muestra de 298 trabajadores en la que los resultados señalan que es 2,6 veces mayor la probabilidad de ocurrencia de molestias a nivel de cuello cuando está presente el factor de riesgo de manipulación manual de carga, en el caso de la presencia de molestias musculoesqueléticas a nivel de extremidad superior derecha existe una probabilidad de 4,1 veces mayor ante la presencia del riesgo y 1,64 veces a nivel de extremidad superior izquierda [21].

Los riesgos de seguridad más frecuentes del sector de metalurgia es golpes y choques contra objetos o herramientas esto debido a que las dimensiones del puesto de trabajo son reducidas impidiendo movimiento naturales del cuerpo humano, las dimensiones de las maquinas son grandes y móviles, produciendo posibles accidentes [22]; además el uso de herramientas manuales del golpe que pueden generar contusiones, cortes en la manos y extremidades superiores en la que se recomienda mantenimiento y uso de herramientas que cumpla con condiciones ergonómicas; cabe mencionar que en las actividades del sector metalúrgico el sobreesfuerzo debido a la manipulación de cargas en la que se desplazan en distancias importante sin ayuda mecánica de ningún tipo que genera posturas forzadas sostenidas [23].

La Organización Internacional del Trabajo (OIT) calcula que las enfermedades y traumatismos ligados a la actividad laboral son de un millón cien mil defunciones en la que se presenta sesenta millones de casos de nuevas de enfermedades relacionadas con las condiciones laborales en la que se han determinado enfermedades respiratorias, cardiovasculares, afecciones osteo-articulares, cáncer, sordera, y musculares, problemas de reproducción, enfermedades mentales y neurológicas [24]; la realización Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo (ENCT), España, en el que se determinó que el 27,1% de los trabajadores del metal, consideran que sus actividades en el sector metalmeccánico genera afectaciones en la salud en la que los principales padecimientos son en un 57,6% dolor de espalda, 28,1% el dolor de cuello, 27,9% para el estrés, 16,4% dolor en miembros Superiores y un 9,1% para dolor en muñeca o manos [25].

En el Análisis causa-efecto de los accidentes laborales en PYMES del Sector Metalmeccánico en Cartagena determinó que el 31,25% de las empresas presentan mayor índice de frecuencia por encima de los 100 accidentes, en la que de cada 4 de 5 empresas del sector metalmeccánico, no cuenta con un programa de seguridad laboral esto debido a condiciones informales y el 44% representa las empresas que no cuentan con el programas de seguridad y salud en el trabajo que por consecuencia presenta los índices más altos de accidentalidad [7].

Según el comportamiento de la accidentalidad en una empresa metalmeccánica en Cartagena, Colombia, entre los agentes causales de los accidentes laborales, se destacan las herramientas manuales con un 66,6% (24 de 36), los materiales con un 27,7% (10 de 36), y luego otros agentes con 5,5% (2 de 36) fueron identificados. De acuerdo con los mecanismos existentes que dan origen a los accidentes se destaca los atrapamientos 27,7% (10 de 36), por máquinas un 41,6% (15 de 36), el contacto con sustancias 5,5% (2 de 36) y la caída de objetos con 25% (9 de 36). De los reportes del año 2014 se presentó un nivel de incapacidades por accidentalidad del 63%, mientras el restante fue 36,1% no generaron incapacidad laboral [26].

En un estudio realizado en México sobre el conocimiento y actitud en prevención de trabajadores lesionados de una empresa metalmeccánica, a 53 trabajadores se les realizó una encuesta en la que consideran riesgos frecuentes con un 21,6% el manejo de herramientas manuales, 11,8% es el desmontaje de piezas y el 66% respondió desconocer los altos niveles de exposición al riesgo en la zona de trabajo, 84,3% representa el uso inadecuado de las herramientas, en la que 78,43% de los encuestados respondió usar una navaja como destornillador y el 5,87% manifestaron el mal estado de las mismas que a pesar de su desgaste, continúa dándose uso y solo el 9,8% de los trabajadores usan herramientas acorde a las actividades [27].

En el análisis de la PYMES en el sector metalmeccánico y su compromiso con la seguridad industrial menciona las principales causas de accidentes es la exposición [28] de los trabajadores son las emisiones de polvos, vapores, partículas, sobreesfuerzos y generación de contaminantes por uso de líquidos de suspensión como aceites, grasas; sin embargo existen otros riesgos laborales en el sector metalmeccánico como riesgos químicos, físicos, psicosociales (acoso laboral), mecánicos, térmicos eléctricos, industriales y medio ambientales [29].

Por otra parte, la incidencia presentada por las condiciones ergonómicas en las extremidades superiores mencionan que los trastornos musculoesqueléticos en el lugar de trabajo, señalan que la presencia de cargas superiores a 3 Kg, que en el ámbito del sector metalmeccánico es frecuente el transporte y levantamiento de piezas pesadas, en la que se genera lesiones en el codo, como epicondilitis o *codo de tenista*, la cual es una lesión por realizar esfuerzos repetitivos en el movimiento de pronación-supinación forzada, en la que se inflaman los tendones de los músculos de la cara externa del codo (los alcances son desde el antebrazo, brazo, muñeca y dedos) con un origen común (unión) en el Epicondilo; la tercera parte de lesiones presentadas en el ámbito laboral se realizan por el exceso de movimientos de pronosupinación, flexo-extensión o ambos en la que el 99,41% presentan un diagnóstico de epicondilitis, debido a que la articulación del miembro superior recibe las presiones de los dos movimientos a la vez [30].

Según la evaluación del riesgo para la extremidad superior el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo propone para el registro de las posturas de trabajo que solo es necesario valorar uno de los lados, durante el proceso de observación del operador trabajando, sin embargo si existen dudas por parte del observador se deberán valorar ambos lados; por otro lado, el cálculo de acciones técnicas repetitivas, frecuencia de acción y acciones totales realizadas deben tener en cuenta los siguientes criterios: alcanzar-mover, agarrar-coger, coger con una mano, volver a coger con la otra mano, posicionar, introducir, sacar, tirar de, soltar de, dejar de, poner en marcha, acciones específicas durante una fase del proceso, andar y transportar; ya identificadas las acciones realizadas, se suman las acciones totales para cada extremidad, se mide en el tiempo la duración del ciclo y por último se calcula la frecuencia de la acción dividiendo las acciones técnicas sobre la duración del ciclo en minutos [31].

El uso de herramientas manuales en el sector metalmeccánico, la antropometría dinámica: movimientos de la mano y la muñeca se definen en flexión: Consiste en el movimiento que dobla o disminuye el ángulo entre dos segmentos del cuerpo, extensión: Se aumenta el ángulo entre dos segmentos del cuerpo, abducción: Movimiento mediante el cual una extremidad se aleja del plano medio, aducción: Movimiento de una extremidad hacia el plano medio, aducción del pulgar: El pulgar se extiende o se flexiona entorno a la palma de la mano, se presenta aducción, pronación y supinación que consiste en hacer girar el antebrazo hacia arriba o hacia abajo y circunducción. Este movimiento consiste en que una parte del cuerpo describe un cono cuyo vértice está en la articulación de la base de la extremidad distal de esa parte y no requiere rotación, prensión: Acción de agarre de un objeto envolviéndolo, pinza: Agarrar un objeto con los dedos índice, corazón, anular y meñique; también, se precisa así la toma por oposición entre el pulgar y otro dedo opuesto, presentado hiperextensión de los dedos, compresión digital o palmar: Es la acción de presionar un objeto con la palma de la mano [32].

2.1 Métodos de evaluación

El método RULA fue desarrollado para la evaluación de miembros superiores del cuerpo en la medición de posturas, repetitividad de movimientos, fuerzas aplicadas y actividades musculoesqueléticas que se dividen en dos grupos A y B, determinado por discernimientos de análisis de las extremidades superiores e inferiores; las mediciones se realizan al trabajador con un consentimiento informado, debido a que se requiere observación o medición de ángulos. Y según su puntuación se determina el grado de severidad o exposición del riesgo; no obstante, el grupo a evaluar, grupo A con la siguiente valoración: Brazo desde 20° de extensión a 20° de flexión, extensión >20° o flexión entre 20° y 45° flexión entre 45° y 90°, flexión mayor de 90°; antebrazo: Flexión entre 60° y 100°, flexión <60° o mayor a 100°;

muñeca: Si está en posición neutra respecto a flexión, flexionada o extendida entre 0° a 15° y flexión o extensión mayor a 15° [33].

Otro método de evaluación de extremidades superiores mencionado en evaluación y propuesta de mejoras ergonómicas y de salud ocupacional para el proceso de fabricación de acero simple es el Check-list-OCRA que permite valor desórdenes traumáticos acumulativos de extremidades superiores (mano, muñeca, antebrazo y codo), debido a movimientos repetitivos, en la que se basa en la medición de seis variables: la intensidad del esfuerzo, la duración del esfuerzo por período de trabajo, el número de esfuerzos realizados por minuto, el ángulo de la muñeca respecto a la posición neutra, la velocidad con la que se realiza la tarea y la duración de la misma por jornada de trabajo, que da como resultado el valor del Índice Check List OCRA (ICKL) es el resultado de la suma de cinco de factores que son: la sumatoria del FR Factor de recuperación, FF Factor de frecuencia, FFz Factor de fuerza, FP Factor de posturas y movimientos, FC Factor de riesgos adicionales por MD Multiplicador de duración y el cálculo del Factor de Posturas y Movimientos[34].

3. MÉTODO

3.1 Fase I

3.1.1 Análisis documental

Colección y clasificación de información de fuentes secundarias (Normas técnicas, Guías de atención integral, entre otros). (Figura 1)



Figura 1. Estudio y la investigación documental: Estrategias metodológicas y herramientas TIC

3.1.2 Tamaño muestral

Los cálculos del espacio muestral estarán sujetos al método de estimación de la muestra de conformidad con el anexo A de la NTC 5654 de 2016 [35]. Mediante la observación directa se caracterizarán los diferentes procesos en los que se emplean herramientas de golpe considerando las áreas de operación, definiendo el perfil demográfico mediante encuesta (ver Figura 2).



Figura 2. Determinación del tamaño muestra [www.fisterra.com]

3.1.3 Valoración Física Estática

Como referente para la construcción de la Base de Datos antropométrica y perfil demográfico se evaluarán las variables dispuestas por la NTC 5654, identificando la estructura funcional para la captura de datos la medición

directa soportada por el Manual de medidas antropométricas [35]. Identificación de factores de riesgo mediante observación directa con aplicación de Check-list OCRA y método RULA, valorando límites superior e inferior asociados con: posturas forzadas mediante la valoración de extension y flexiones en codo, extensión flexión y desviación radio ulnar en muñeca; fuerzas y repetitividad.

3.2 Fase II

3.2.1 Especificación requerimientos Funcionales y No Funcionales

Documentación funcional de los aspectos técnico a considerar en el diseño del objeto virtual de aprendizaje de monitoreo apoyado por el estándar de IEEE 830.

3.2.2 Prototipado

Evaluación de los requerimientos en el mapeo y construcción de un sistema operacional.

3.2.3 Functional Testing

Comprobación práctica de la operación y rendimiento del sistema con el acompañamiento de la asesoría externa, registro de datos (Figura 3).



Figura 3. Norma IEEE 830 para especificación de requerimientos de software

3.3 Fase III

3.3.1 Captura información mediante el objeto virtual de aprendizaje

Registro información mediante captura de datos con el sistema electrónico de monitoreo (Figura 4).

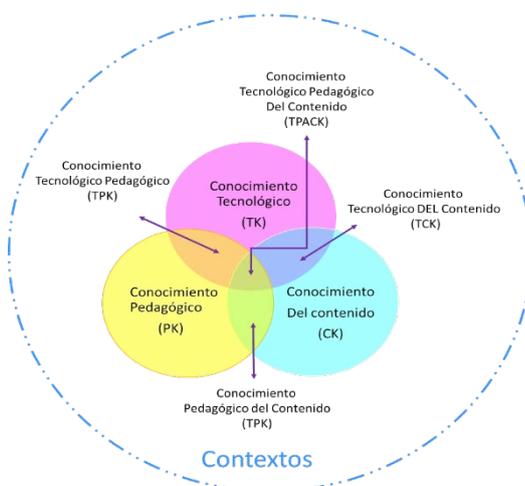


Figura 4. Mapas conceptuales en la captura y representación de conocimiento experto docente en el uso de las TIC

3.4 Fase IV

3.4.1 Integración de variables de estudio

Agrupación de factores mediante técnicas estadísticas para agrupar individuos o variables en clases o conglomerados, para la presentación de los resultados (Figura 5).

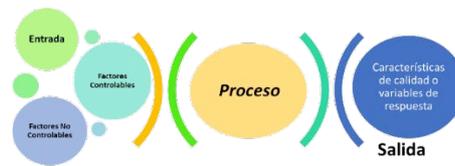


Figura 5. Definiciones básicas del diseño de experimentos Universidad Politécnica de Valencia

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Caracterizar las condiciones organizacionales determinando un perfil ocupacional de los trabajadores de las organizaciones objeto de estudio

La recolección de información del comportamiento ocupacional de diferentes empresas de la industria metalmeccánica permite determinar los posibles factores ergonómicos dimensionales que servirán en la comparación con otras empresas en condiciones formales e informales del sector. Con respecto al área de investigación del sector metalmeccánico de las 301 organizaciones de acuerdo a la base de datos empresarial proporcionada por la Alcaldía de Soacha [36], 156 (52%) se dedican principalmente al tipo de sociedad de persona natural en la que el individuo adquiere responsabilidades por actividades mercantiles, 104 (35%) conformada por organizaciones de sociedad por acciones simplificadas en la que un grupo de personas naturales o jurídicas son responsables de sus aportes en las empresas, 30 (10%) representa sociedad de responsabilidad limitada que se basa en el capital aportado por los accionistas, 7 (2%) se constituyen como organizaciones unipersonales y 4 (1%) como sociedad sin ánimo de lucro según la Tabla 1.

Tabla 1. Tipo de sociedad del sector metalmeccánico del municipio de Soacha

Tipo de sociedad	Empresas
Anónima	4
Empresa Unipersonal	7
Limitada	30
Personal Natural	156
Sociedad por Acciones Simplificadas	104
Total	301

Nota: Enfoque de documentación sistemática sobre el sector metalmeccánico de municipio de Soacha Cundinamarca. El registro de matrícula mercantil es el medio para que los comerciantes y/o establecimientos cumplan con las obligaciones dispuestas en código de comercio [37], en la cual parte de las organizaciones fue avanzando en realizar el proceso de registro, considerando que en el año 1972 se registraron 4 (1%) organizaciones en condición de informalidad, hasta el año 2016 se presentaron 40 (13%) empresas registradas y las 261 (87%) restantes se consideran en condición de informalidad (Figura 6), incluyendo la trazabilidad en tiempo del número de registros (Figura 7).

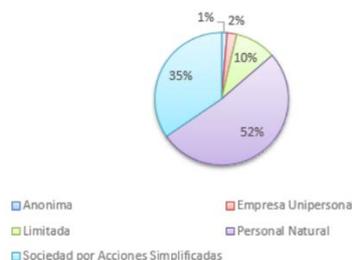


Figura 6. Porcentaje de entidades según su tipo de matrícula mercantil

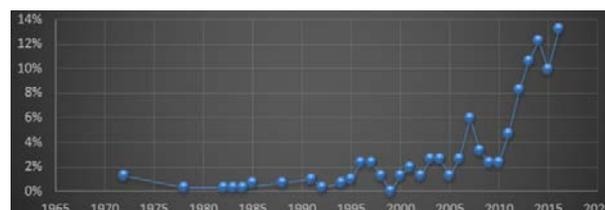


Figura 7. Trazabilidad de entidades desde el año 1972 hasta el año 2018 inscritas con matrícula mercantil

De acuerdo a la descripción económica se seleccionó dos actividades específicas: fabricación de productos metálicos para uso estructural y fabricación de otros productos elaborados de metal n.c.p. [38] de las organizaciones del sector metalmeccánico en el municipio de Soacha Cundinamarca, se dividió en seis comunas, en la que corresponden Comuna 1 (Compartir) un 7% con 22 empresas, Comuna 2 (Centro) un 34% tomando con mayor ubicación de organizaciones

dedicadas a esta labor, Comuna 3 (Despensa) un 30% con 89 empresas, Comuna 4 (Cazucá) un 5% con 16 organizaciones, Comuna 5 (San Mateo) con un 14%, Comuna 6 (San Humberto) con 6% con 17 organizaciones ubicadas en el sector; sin embargo 11 organizaciones se encontraban ubicadas en los límites y veredas del municipio (Figura 8).

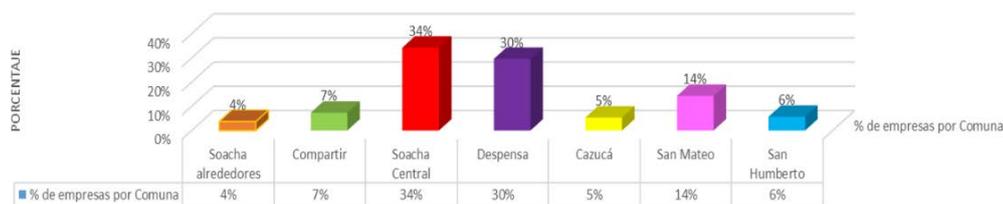


Figura 8. Porcentaje de organizaciones por comuna en el municipio de Soacha Cundinamarca

Según los resultados de la base de datos y las características en el sector metalmeccánico el 85% se clasifican en microempresas, el 11% en pequeñas empresas, un 3% de medianas empresas y un 1% como grandes empresas de la industria (Figura 9).

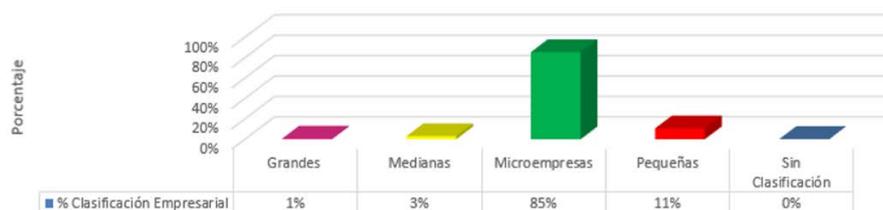


Figura 9. Clasificación de organizaciones del sector metalmeccánico según su tamaño

Según el código CIU (2511) con 35%, siendo la principal actividad del sector, con un 14% (código 2599) representa la fabricación de otros productos elaborados de metal, el 7% (código 2410) industrial básicas de hierro y de acero, con un 6% (código 2432) se comparte la actividad de fundición de metales no ferrosos y fabricación de partes, piezas (autopartes) y accesorios; por último el 2% (código 2512, 2920 y 2930) corresponde a las actividades de fabricación de carrocerías para vehículos, fabricación de tanques, depósitos y recipientes de metal, excepto los utilizados para el envase o transporte de mercancías y fundición de hierro y acero, entre otras (Tabla 2).

Tabla 2. Relación entre número de actividades y el porcentaje de empresas registradas en la Cámara de Comercio

Código	Descripción	Número	% de empresas
2410.	Industrias básicas de hierro y de acero	21	7%
2431.	Fundición de hierro y de acero	12	4%
2432.	Fundición de metales no ferrosos	17	6%
2511.	Fabricación de productos metálicos para uso estructural	105	35%
2512.	Fabricación de tanques, depósitos y recipientes de metal, excepto los utilizados para el envase o transporte de mercancías	11	4%
2599.	Fabricación de otros productos elaborados de metal n.c.p.	41	14%
2920.	Fabricación de carrocerías para vehículos automotores; fabricación de remolques y semirremolques	12	4%
2930.	Fabricación de partes, piezas (autopartes) y accesorios (lujos) para vehículos automotores	19	6%

Nota: Descripción de las actividades económicas más relevantes del sector metalmeccánico es la fabricación de productos metálicos u otras industrias manufactureras.

El nivel de registro de matrícula mercantil (Tabla 3) por parte de las entidades fue avanzando, considerando que en 1972 se registraron 4 organizaciones en condición de informalidad, hasta el año 2016 se presentaron 40 empresas registradas y 261 restantes se consideran en condición de informalidad.

Tabla 3. Ubicación organizaciones por comuna del municipio de Soacha Cundinamarca

Comuna	Empresas por comuna
0 Vereda Panamá Vereda Bosatama, vía Sibaté, límites con Soacha	11
1 Compartir	22
2 Soacha Central	103
3 Despensa	89
4 Cazucá	16
5 San Mateo	43
6 San Humberto	17
Total	301

De acuerdo a la segmentación de las organizaciones del sector metalmecánico, en el municipio de Soacha Cundinamarca (Tabla 4) se dividió en seis comunas.

Tabla 4. Tamaño organizaciones del sector metalmecánico del Soacha Cundinamarca

Clasificación	Número
Grandes	2
Medianas	9
Microempresas	257
Pequeñas	32
Sin Clasificación	1
Total	301

Nota: De acuerdo a su actividad económica se define mediante criterios de volumen de (ventas y trabajadores)

La evaluación de factores de riesgo ergonómico mediante la intervención de herramientas de medición corporal, realizada a trabajadores de 14 empresas del sector metalmecánico en año 2019. A partir de allí, se realizó el análisis de los resultados, que permitió identificar variables que inciden en desarrollo de lesiones musculo esqueléticas en la población trabajadora, estableciendo mediante la recolección sistemática datos relacionados con aspectos de riesgo ergonómico y un análisis epidemiológico.

Dentro de la indagación realizada mediante entrevistas realizadas a 40 de los trabajadores se destaca que el 95% son principalmente hombres, en un área de producción de (85%) y cuentan con un nivel de educación media (bachillerato) con 80% y nivel de educación técnica o superior del (15%) con un nivel de capacitación en términos empíricos de un (80%) en procesos de manufactura del sector metalmecánico. Organizaciones contratan por obra o labor dependiendo de la demanda presentada durante el año y por tanto mínima de 20 años y máxima promedio de 45 años; de acuerdo con esta caracterización y el perfil ocupacional identificado, se definen rangos como la importancia de vinculación de personal con baja exigencia académica y dominio del género masculino. Las microempresas evidencian la dificultad de aumentar la capacidad de producción, debido a la informalidad presente en las organizaciones y la falta de capacidad en el pago de prestaciones sociales; en contraste a los perfiles laborales del sector metalmecánico, en los corredores de Duitama y Sogamoso se proponen términos de políticas y proyectos de inclusión al sector educativo que aumente la experticia del trabajador y así mejore su calidad de vida [39].

En cuanto a la medición de altura de los trabajadores encuestados y a quienes mediante un tallimetro de pared se determinó que el promedio de altura es de 1,67 metros, en la que se evidencio no tener soportes de trabajo o equipos como mesas, cortadoras, dobladoras graduales con una altura adecuada sin satisfacer la necesidades funcionales de la tarea, debido a que según la altura recomendada de trabajo se determina mediante 3 tipos de altura según la actividad a realizar [40]; la primera es trabajo de precisión entre 1 metro y 1,10 metros con base al piso, la segunda trabajo ligero entre 90 y 95 centímetros y por último trabajo de fuerza con una altura de 75 a 90 centímetros, al no realizar los cambios graduales se pueden presentar problemas musculo esqueléticos como dolor espalda, dolor lumbar, dolor en articulaciones, principalmente muñecas debido a las posturas adoptadas [41].

Respecto al índice de masa corporal en promedio es de 24,5 kilogramos, el cual se calculó dividiendo el peso corporal con la altura y según los valores se determinó que los trabajadores presentan sobrepeso de acuerdo a los valores de determinación de obesidad propuesta por la organización mundial demostrando un tendencia ascendente debido a factores de crecimiento económico, estilo de vida poco saludable, mayor consumo de alimentos con carbohidratos, y disminución de la actividad física, según la Encuesta Nacional de la situación Nutricional en Colombia (ENSIN, 2010), el 39% de hombres entre 18 y 64 años presentó obesidad abdominal, causando enfermedad cardiovascular y metabólica, así como también trastornos metabólicos y nutricionales con consecuencias irreversibles para la salud. De acuerdo con estudio realizado en México sobre el rendimiento laboral en el sector metalmecánico, los trabajadores con sobrepeso varia su desempeño dependiendo de la intensidad y tiempo de duración del trabajo, así como con el sobre esfuerzo se presentan fatiga, como consecuencia incrementan los accidentes laborales y ausentismo [42].

En cuanto al porcentaje de masa muscular y esquelética el promedio es de 36% en hombres entre un rango de edad de 18 a 59 lo cual es considerado normal, sin embargo estudios recientes informan que si bien la pérdida de masa muscular relativa es más temprana, situándose a la edad de 30 años, la masa muscular absoluta no comienza a descender hasta los 50 años [43] como consecuencia de la pérdida de la masa muscular, la tasa de metabolismo basal disminuye un 30% entre los 20 y los 70 años, es así que a la probable disminución de actividad física, y a la disminución del gasto energético; la pérdida muscular también trae enfermedades adicional como la artritis reumatoidea, enfermedad arterial periférica, las EPOC, insuficiencia cardiaca congestiva, nefropatía avanzada, cirrosis, el cáncer, el VIH y otras que aumentar la pérdida muscular como la caquexia, caracterizada clínicamente por una gran pérdida de peso y emaciación marcada, asociadas a una enfermedad grave y al envejecimiento [44].

De acuerdo a las 14 empresas encuestadas el estado del lugar de trabajo se evidencio que el 86,36% cumplen con los pisos tienen superficies seguras y adecuadas para el trabajo, los pisos y pasillos en todas las áreas están libres de obstáculos que puedan producir un accidentes, las entradas y salidas de producción están libres de obstrucciones, los

equipos se encuentran limpios y libres de materiales innecesarios o colgantes, los baños están debidamente dotados y en cantidad suficiente para el personal, el sistema de iluminación y ventilación en el lugar es eficiente; sin embargo, existe un 13,63% que no cumple ya que se mantienen con desperdicios debido a la acumulación de residuos o de materiales que representa un 2,59%, por ello, la importancia de aplicar la GTC 24 de 2012, que permite dar aprovechamiento y manejo en cuanto los criterios de separación, así como también espacios inadecuados debido a la falta de ventanas y puertas, puesto que muchas de estas organizaciones son unidades residenciales adecuadas para estas labores.

El uso de elementos de protección personal (EPP), como guantes, cinturón, zapatos de seguridad, las gafas protectoras, máscaras, tapabocas y tapa oídos, representan un (87%) de las 14 empresas afirman que los utilizan; sin embargo, durante las visitas se evidenció que muchos de los trabajadores usan de forma inadecuada los elementos con las gafas en la frente, tapabocas en el cuello y la careta de soldar en la cabeza, sin tener conciencia misma de la pérdida de la calidad de vida y de la salud debido a que se enfrentan a factores de ruido, vibraciones, temperaturas, radiaciones no ionizantes y radiaciones ionizadas en lugares o espacios de trabajo, así las máquinas y herramientas que pueden generar caídas, aplastamiento, cortes, atrapamientos o proyecciones de partículas a la altura de la cara, afirmando que los EPP deben ser utilizados cuando los riesgos no se pueden eliminar, o controlar suficientemente, por medio de protección colectiva. Solo sirve para minimizar las consecuencias de un accidente, siendo la última barrera frente a la situación de riesgo [45].

Las organizaciones encuestadas según los resultados, seis de ellas se encuentran en condiciones informales que representan el 57% de las que no proveen y no usan elementos de protección personal los trabajadores o mismos propietarios; por otra parte la identificación de las zonas de trabajo representa un 44,9% de acuerdo a la *check list* aplicada y se dividen en los siguientes ítems y porcentajes: el personal conoce donde están ubicadas las zonas de encuentro si se presenta una emergencia con un 8,5%, el personal conoce la ubicación de los extintores con un 8,57%, existe señalización de advertencia frente a riesgos específicos con un 7,85%, los extintores se encuentran ubicados a una altura cómoda para su manipulación y están libres de obstáculos con un 7,14%, el personal realiza sobre esfuerzo durante la carga de productos con un 6,42%, el almacenamiento de productos químicos se encuentra en un lugar para tal fin y existe identificación de área de almacenamiento representado en un 6,42%; lo que permite observar de forma positiva que un porcentaje significativo de los propietarios conocen muchos de los riesgos físicos, químicos, económicos, sociales y ambientales a los que están expuestos y aplican conocimientos de seguridad y salud en trabajo; sin embargo, es necesario que exista un acompañamiento profesional que aumente el nivel de seguridad en sus trabajadores y de ellos mismos como empleadores.

De acuerdo con la sección de seguridad y salud en trabajo, el cual representa el 41,96% se dio respuesta a los siguientes interrogantes con sus correspondientes porcentajes: los equipos (en todas las áreas) funcionan perfectamente con un 9,8%, se realiza mantenimiento preventivo periódico a las máquinas (8,57%), así mismo buen uso de herramientas de corte con un (7,79%), herramientas de mantenimiento se encuentran en buen estado (8,4%) y un área designada para el almacenamiento de herramientas (7,4%), lo que permite identificar los beneficios del mantenimiento preventivo y predictivo como lo es la reducción de costos de mantenimiento, reducción de fallas en máquinas, aumento de vida de las piezas, mejorar las condiciones de seguridad del trabajador.

5. CONCLUSIONES

El objetivo de la revisión y análisis bibliográfico, consistió en determinar las condiciones organizacionales mediante un perfil ocupacional aplicando métodos de evaluación ergonómica y antropométrica aplicado en diferentes talleres de metalmecánica; acorde a la captura de datos necesarios para la aplicación del monitoreo electrónico, en la que se determinó mediante la aplicación del índice de masa corporal cubriendo así la evaluación completa y el índice de resultados; así como también la Somato carta otro modelo de evaluación antropométrico, dado a que se ajusta los requerimientos del prototipo y puede permitir verificar la trazabilidad de la cantidad de fuerza y movimiento producido por el uso de herramientas de golpe, logrando determinar el perfil ocupacional acorde a las actividades en el sector metalmecánico, el porcentaje de eliminación de movimientos innecesarios en las tareas realizadas para así identificar y evitar las enfermedades laborales de las extremidades superiores.

Con respecto al área de investigación del sector metalmecánico de los 301 organizaciones de acuerdo a la base de datos obtenida de la Cámara de Comercio [38], 156 (52%) se dedican principalmente al tipo de sociedad de persona natural en la que el individuo adquiere responsabilidades por actividades mercantiles, 104 (35%) conformada por organizaciones de sociedad por acciones simplificadas en la que un grupo de personas naturales o jurídicas son responsables de sus aportes en las empresas, 30 (10%) representa sociedad de responsabilidad limitada que se basa en el capital aportado por los accionistas, 7 (2%) se constituyen como organizaciones unipersonales y 4 (1%) como sociedad sin ánimo de lucro.

De acuerdo a lo observado en el sector metalmecánico y las actividades realizadas se requiere de fuerza física y por tanto se ha arraigado que al ser una labor operativa, el género masculino participa en mayor grado en estas

actividades limitando la vinculación a estas labores a las mujeres; también se evidenció que la formación educativa llega a nivel de bachiller o formación técnico profesional sin la participación de formación universitaria en relación a las competencias que realizan y se propone fomentar mediante el uso de tecnologías de la información aspectos de inclusión productiva y seguridad y salud en el trabajo basado en estrategias de formación.

De acuerdo a los resultados de índice de masa corporal se presenta sobrepeso en los trabajadores encuestados y según la investigación realizada en México sobre la relación entre la obesidad y el rendimiento laboral [42], no existe relación o asociación significativa en la productividad; sin embargo las variables tomadas como la edad, altura, peso, cantidad de fuerza y levantamiento de cargas son medios para identificar posible estado de sobrepeso, que a futuro y por consecuencia se puede presentar ausentismo laboral; por ello, la importancia de generar programas y acompañamientos a pequeñas organizaciones es crear una cultura de prevención y promoción de estilos de vida saludable que mitiguen y minimicen los riesgos, permitiendo que tanto trabajadores, empresarios y el sector laboral del municipio de Soacha promueva políticas públicas serias frente al bienestar y calidad de vida de la población trabajadora.

Se observa la falta de sensibilización por parte de las organizaciones frente a la importancia del uso de los elementos de protección personal y las consecuencias que puede traer consigo el alto nivel de riesgo que existe sobre los operarios el no utilizar los implementos de seguridad como lo demuestran [7] al hacer un análisis causa-efecto de los accidentes laborales en PYMES del sector metalmeccánico en Cartagena donde se evidenció el alto porcentaje de trabajadores (87,5%) en las empresas metalúrgicas que son víctimas de accidentes, ya que el equipo de protección personal no está empleado en absoluto, o no está empleado adecuadamente. Por otro lado, se desestima el alto costo que genera los accidentes de trabajo en aspectos legales y económicos que impactan a la empresa como por ejemplo la afiliación de empleados al sistema de seguridad social.

La falta de aplicación de conocimientos técnicos sobre la correcta disposición de las áreas de trabajo, el no uso de señalización aumenta los riesgos tal como evidencia los resultados del estudio se determinó que el 37,50% de los accidentes que ocurren son causados por el desconocimiento humano y el tránsito de empleados a través de áreas sin señalización o demarcadas de forma precaria.

REFERENCIAS

- [1] DANE. (2017). Boletín técnico: Cuentas Trimestrales-Colombia Producto Interno Bruto (PIB). Primer Trimestre de 2017.
- [2] DANE. (2017). Encuesta anual manufacturera (EAM) históricos. Recuperado: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam/eam-historicos>.
- [3] Macri, M. et al. (2016). Manual de Buenas Prácticas Industrial Metalmeccánica. Recuperado: <https://www.srt.gob.ar/wp-content/uploads/2016/04/MBP--Industria-Metalmeccanica.pdf>.
- [4] Katz, J. (1982). Cambio tecnológico en la industria metalmeccánica latinoamericana. *Desarrollo científico y tecnológico en América Latina* 51, 82-83.
- [5] Ministerio de Gobierno de la República de Colombia. (1994). Decreto 1295 de 1994. Recuperado: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=2629>.
- [6] Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. (2002). Decreto 1607 de 2002. Recuperado: https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/DECRETO%201607%20DE%202002.pdf.
- [7] Revista Soluciones de Postgrado EIA. (2013). Caracterización y análisis del riesgo laboral en la pequeña y mediana industria metalmeccánica en Cartagena-Colombia. *Revista Soluciones de Postgrado EIA*, 10, 13-40.
- [8] Pineda, T., Soto M. y Verruschi, G. (2014). Evaluación ergonómica en una empresa metalmeccánica del centro de Venezuela. Recuperado: <https://www.prevencionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2014/evaluacion-ergonomica-en-empresa-metalmeccanica-centro-venezuela>.
- [9] Porras, J. (2007). Análisis de 3 pymes en el sector metalmeccánico del siete de agosto y su compromiso con la seguridad industrial. Recuperado: <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/40973.pdf>.
- [10] Campo, M. et al. (2008). Caracterización económica y empresarial. Recuperado: <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/2875>.
- [11] Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). Caracterización económica y empresarial de diecinueve municipios de Cundinamarca. Recuperado: <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/14584>.
- [12] Montiel, M. et al. (2006). Valoración de la carga postural y riesgo musculoesquelético en trabajadores de una empresa metalmeccánica. Recuperado: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01382006000100006.
- [13] Universidad Politécnica de Valencia. (2020). Ergonomía en el trabajo y prevención de riesgos laborales. Recuperado: <https://www.ergonautas.upv.es/>.
- [14] Hernández, P. (2016). Utilidad de las metodologías REBA, RULA y OCRA para valorar la carga física en trabajadores de una empresa del sector floricultor. Recuperado: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwjkrK5i4ToAhUFhOAKHaIDC8cQFjACegQIAhAB&url=http%3A%2F%2Fbdigital.unal.edu.co%2F55012%2F1%2F65829162.2016.pdf&usq=AOvVaw2MTVTjq4tZck-cxfZEwExR>.
- [15] Batalla, C., Bautista, J. y Alfaro, R. (2015). Ergonomía y evaluación del riesgo ergonómico. Recuperado: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/26070/OPE_Ergo_metodos.pdf.
- [16] García, M. et al. (2013). Análisis de métodos de valoración postural en las herramientas de simulación virtual para la ingeniería de fabricación. Recuperado: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/32747>.
- [17] Arenas, L. y Cantú, O. (2013). Factores de riesgo de trastornos músculo-esqueléticos crónicos laborales. *Med Int Mex.* 29, 370-379.

- [18] Luttman, A. et al. (2004). Prevención de trastornos musculoesqueléticos en el lugar de trabajo. Recuperado: <https://www.osha.gov/Publications/OSHA3749Spanish.pdf>.
- [19] Vargas, P., Orjuela, M. y Vargas C. (2009). Lesiones osteomusculares de miembros superiores y región lumbar: caracterización demográfica y ocupacional. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado: <http://scielo.isciii.es/pdf/eg/v12n32/docencia2.pdf>.
- [20] Córtes, M. y Ramos, I. (2017). Revisión documental de los métodos diagnósticos y de tamizaje en desórdenes músculo esqueléticos en miembros superiores de etiología laboral. Recuperado: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/39988/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [21] Cerda, E. et al. (2015). Estudio de Condiciones de Trabajo de la Industria Manufacturera relacionada a factores de riesgos de trastornos musculoesqueléticos dorsolumbares para establecer estrategias y recomendaciones de prevención en el sector. Recuperado: https://www.achs.cl/portal/fucyt/Documents/Proyectos/181_2015_UCH_Cerda MMC Informe_final_231117.pdf.
- [22] Sepruma. (2007). Factores de riesgo que están presentes y forma de prevenir los riesgos asociados. Recuperado: <https://www.uma.es/publicadores/prevencion/wwwuma/FACTORESPRESENTES EN LAMANIPULACION MANUAL DE CARGAS.pdf>.
- [23] Tarradella, J. (2008). Prevención de riesgos laborales en el sector del metal. Recuperado: https://www.mc-mutual.com/documents/20143/47599/manual_metal_es.pdf/48a058b5-06cc-3540-0143-4d5d6bbc4812.
- [24] Sánchez, M. et al. (2017). Enfermedades actuales asociadas a los factores de riesgo laborales de la industria de la construcción en México. Recuperado: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0465-546X2017000100028.
- [25] Soriano, G. (2009). Las enfermedades profesionales en el sector del Metal. Recuperado: http://portal.ugt.org/saludlaboral/publicaciones/manual_estudio/2009-05.pdf.
- [26] Bedoya, E. (2015). Comportamiento de la accidentalidad en una empresa metalmeccánica en Cartagena, Colombia. NOVA 13(24), 93-99.
- [27] Zamorano, B. et al. (2009). Conocimiento y actitud en prevención de trabajadores lesionados de una empresa metalmeccánica en México. Recuperado: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01382009000100005.
- [28] Gómez, J. (2007). Análisis de las pymes en el sector metalmeccánico y su compromiso con la seguridad industrial. Recuperado: <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/40973.pdf>.
- [29] García, J., Velosa, D. y Sánchez M. (2012). Análisis de la capacidad tecnológica en Pymes metalmeccánicas: Una metodología de evaluación. Recuperado: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602012000100009.
- [30] FREMAP. (2018). Prevención de trastornos musculoesqueléticos de origen laboral en las extremidades superiores. Recuperado: <https://prevencion.fremap.es/Buenas%20prcticas/MAN.071%20-%20Preveni%C3%B3n%20TME%20origen%20laboral%20en%20extremidades%20superiores.pdf>.
- [31] García, J., Velosa, D. y Sánchez M. (2012). Análisis de la capacidad tecnológica en Pymes metalmeccánicas: Una metodología de evaluación. Recuperado: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602012000100009.
- [32] Enríquez, M. (2014). Síndrome del túnel carpiano. Recuperado: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X201400050001.
- [33] García, J., Velosa, D. y Sánchez, M. (2012). Análisis de la capacidad tecnológica en Pymes metalmeccánicas: Una metodología de evaluación. Recuperado: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602012000100009.
- [34] García, J., Velosa, D. y Sánchez M. (2012). Análisis de la capacidad tecnológica en Pymes metalmeccánicas: Una metodología de evaluación. Recuperado: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602012000100009.
- [35] García, J., Velosa, D. y Sánchez M. (2012). Análisis de la capacidad tecnológica en Pymes metalmeccánicas: Una metodología de evaluación. Recuperado: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602012000100009.
- [36] Cámara de Comercio de Bogotá. (2016). Novedades en la provincia de Soacha. Recuperado: www.ccb.org.co.
- [37] Cámara de Comercio de Bogotá. (2020). Qué es matrícula mercantil. Recuperado: <https://www.ccb.org.co/Preguntas-frecuentes/Tramites-registrales/Que-es-la-matricula-mercantil>.
- [38] Cámara de Comercio de Bogotá. (2020). Descripción actividades económicas (código CIU). Recuperado: <https://linea.ccb.org.co/descripcionciuu/>.
- [39] Botía, R. (2013). El Sector Metalmeccánico: Perfiles laborales y oportunidades de inclusión social en el corredor Duitama – Sogamoso de Boyacá. *Vestigium Ire*. 6, 41-54.
- [40] Delgado, S. (2015). Propuesta de diseño ergonómico para el área de producción de la empresa Maxifritos Ltda. Recuperado: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7228/1/PROPUESTA%20DE%20DISE%C3%91O%20ERGONOMICO%20FINAL.pdf>.
- [41] Ricardo, A. et al. (2013). Obesidad abdominal y ausentismo por causa médica en una empresa de la industria metalmeccánica en Cali, Colombia. *Rev Peru Med Exp Salud Pública* 30(2), 251-265.
- [42] Manzano, E. y López, E. (2016). Relación del sobrepeso y obesidad con el rendimiento laboral en trabajadores de una empresa metalmeccánica en México. *Revista Colombiana de Salud Ocupacional* 6, 103-108.
- [43] Monserrat, P. (2017). Valores de referencia de composición corporal para población española adulta, obtenidos mediante antropometría, impedancia eléctrica (BIA) tetrapolar e interacción de infrarrojos. Recuperado: <https://eprints.ucm.es/43420/1/T38958.pdf>.
- [44] Rastogi, R., Corriere, M. y Ferrucci, L. (2018). Pérdida de masa muscular relacionada con la edad y enfermedades. Recuperado: <https://www.intramed.net/contenidover.asp?contenidoid=83350>.
- [45] Creus. (2011). Importancia de los elementos de protección personal (EPP) en las industrias metalmeccánica en Colombia. En la industria metalmeccánica en Colombia. Recuperado: <https://docplayer.es/62092775-Importancia-de-los-elementos-de-proteccion-personal-epp-en-las-industrias-metalmeccanica-en-colombia-en-la-industrias-metalmeccanica-en-colombia.html>.

El presente capítulo tiene como objetivo, presentar un análisis del Sector metalmecánico en Colombia y en Boyacá en relación a la productividad, para poder establecer los factores que en ella influye a partir de las concepciones y enfoques de expertos en el tema, de informes sectoriales y de los informes nacionales de competitividad de los últimos años; el tipo de investigación es descriptiva no experimental, se realizó la estrategia metodológica del análisis documental, a partir de la misma, se genera los descriptores por extracción, para esta investigación se tomó como soporte académico y teórico las fuentes del crecimiento de la productividad, a saber: 1) Reasignación de factores de producción entre empresas y sectores, 2) Mejora en el desempeño de las empresas, y 3) Mayor productividad de las empresas entrantes y salida de las empresas de baja productividad. Que a su vez son usadas como ítems de evaluación en cada documento, articulados con la reagrupación de los descriptores antes mencionados; se analizaron 22 fuentes documentales, que superaron los filtros de búsqueda. Llegando a concluir que en la productividad influyen de manera destacada aspectos como eficacia, contexto operativo, eficiencia, mejoras tecnológicas, entorno competitivo, sofisticación de los procesos productivos y capacidad innovadora, los cuales, trabajando en red con las fuentes de crecimiento de la productividad, pueden lograr aumentarla y fortalecer la dinámica del sector a partir de re direccionamientos estratégicos.

1. INTRODUCCIÓN

El Informe Nacional de Competitividad 2019-2020 realiza seguimiento a 16 áreas que estructuran la competitividad del país, dentro de ellas está el área de productividad y emprendimiento, donde señala que el crecimiento acumulado 2000-2018 de la productividad total de los factores (PTF) en Colombia es de -17%, por debajo del promedio de América Latina (-12%). El Foro Económico Mundial (WEF) a partir de 2018 situó en la medula de su Índice Global de Competitividad a la productividad [1]. En [2] se alude que *la productividad no lo es todo, pero a la larga es casi todo. La capacidad de un país para mejorar su estándar de vida depende casi exclusivamente de su habilidad de incrementar la producción por trabajador.*

En concordancia, es de interés identificar y analizar la productividad en el sector metalmecánico en Colombia y en Boyacá a partir de la tipificación de lo que representa la misma, para ser verdaderamente competitivos, siendo este sector de especial renombre por su representación en el PIB 11,1% a nivel nacional y con una participación del 11% del PIB a nivel departamental [4]. Lo anterior lo corrobora [5] cuando de manera oportuna afirman que, desde el punto de vista del producto, la medición de la productividad puede ser de orden nacional (PIB), de nivel sectorial (PIB industrial, comercial, etc.), como también de orden microeconómico (empresa o establecimiento).

Partiendo que la productividad es una constante comparación de que tantos resultados esperados se lograron para generar un agregado monetario, es necesario comprender que una mayor producción por unidad de tiempo, está directamente relacionada con producir un aumento de agregado monetario con mismo trabajo o idealmente con menos trabajo y menos capital, tal como lo ratifica [6]. De forma semejante, según afirma [7] se puede entender que la productividad real referenciada a un proceso o sistema de producción, es la consecuencia de la fabricación óptima con conjunto de técnicas, manejo de los capitales y poder lograr convenientemente una labor.

Ahora, si bien, la productividad de una nación establece su capacidad de salvaguardar en la cúspide el nivel de ingresos, igualmente es uno de los concluyentes de los rendimientos de la inversión, siendo directamente proporcional a uno de los coeficientes claves que revelan el potencial de desarrollo de una economía [8]. Es preciso, señalar que la productividad de un país se puede medir por la productividad total de los factores (PTF), los cuales calculan que tan fructífero efecto da la mezcla de insumos de capital y trabajo para generar valor agregado, y también por la productividad por trabajador, donde se mide qué tanto puede producir un trabajador en un intervalo de tiempo [3].

De hecho, es requerimiento tener en cuenta lo indicado por [9], que señala de continuar lineamientos con tendencia a quitar la informalidad, dar un primer lugar a este aspecto en la toma de decisiones, pues ayuda a la productividad, la ecuanimidad y las haciendas oficiales.

El camino hacia la globalización y la principal utilización de los pactos lucrativos a nivel de mercado estimularán la productividad y la generación. A su vez, se destaca lo señalado por [10]: En la capacidad de producción por unidad de trabajo de las organizaciones confluyen activamente varios elementos, unos internos y otros externos; los primeros son aquellos que la organización tiene injerencia directa: productos, tecnología, esbozo en planta, formas de hacer los mercancías, materia prima; los segundos que son del contexto de la organización y que son muy difíciles de

controlar por la misma: cambios económicos, demográficos, recursos naturales y administración pública. De hecho, los proveedores y materia prima empiezan la cadena de cumplimientos de requisitos, [11] indica que se debe asumir la calidad de las materias primas en el resultado de la producción, significando la mejor utilización que beneficie la empresa porque se genera un valor agregado que posiciona mejor la Organización.

2. MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO

El sector metalmecánico, es un sector perteneciente a la industria manufacturera y su insumo base es el metal y aleaciones de hierro, realiza la transformación del acero a diferentes productos, desde láminas, tubos, equipos, estructuras sobredimensionadas, hasta la fabricación de piezas y maquinaria compleja. Los Factores determinantes de productividad de este sector a nivel general, se han venido dinamizando y potencializando, encontrando un aumento en la demanda de sus productos, debido a la articulación con otros sectores como el sector automotriz, petrolero, minero, agroindustrial, en el sector de la construcción, infraestructura y manufactura de una forma muy positiva, igualmente la elaboración de productos y servicios de alta calidad debido al aumento en la especialización de su recurso humano y la automatización de sus procesos [12].

Es necesario entonces, destacar como se ha dado importancia a la acción pura de la productividad; a su vez llegar a la comprensión del papel de la productividad del trabajo, del talento humano, del conocimiento, usando dicho conocimiento para ser aplicado en los momentos de verdad de los procesos productivos, evidenciando resultados en la economía y la evolución competitiva de la Organización, tal como lo sostuvo [13].

De igual manera [14] lo sustenta, cuando sostiene que la productividad está directamente ligada a la demostración de la Organización, por hacer correcto uso del potencial de sus colaboradores en la fabricación o en la prestación del servicio, y que estas acciones de valor agregado incluyen necesariamente la gestión del conocimiento y la productividad.

La cadena siderúrgica y metalmecánica en Colombia, incluye altas sucesiones de transformación y coeficientes que afectan a todo el sistema de producción, distribución y comercio. En Colombia según el Boletín Técnico del DANE - IV Trimestre del año 2019, producto Interno bruto PIB; comunica que el valor económico adicional del sector manufacturero creció 1.6% comparado con el 2018, debido a la producción de los productos inherentes al sector, incluyendo la fabricación de otros tipos de equipo de transporte, instalación y mantenimiento [15]. EN la Figura 1 se observa la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de las categorías de actividades del sector metalmecánico y metalúrgico, que son objeto de interés de la presente investigación.

COD.	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
2410	Insumos principales	Industrias Básicas del hierro y el acero
2429	Insumos principales	Industrias Básicas de otros metales no ferrosos
2431	Insumos principales	Fundición de hierro y acero
2432	Insumos principales	Fundición de metales no ferrosos
2511	Productos intermedios	Fabricación de productos metálicos de uso estructural
2512	Productos intermedios	Fabricación de tanques, depósitos y recipientes de metal
2513	Productos intermedios	Fabricación de generadores de vapor
2520	Productos finales	Fabricación de armas y municiones
2591	Productos intermedios	Forja, prensado y laminado de metal
2592	Productos intermedios	Tratamiento y revestimiento de metales
2593	Productos finales	Fabricación de artículos de cuchillería, herramientas de mano y artículos de ferretería
2599	Productos finales	Fabricación de otros productos elaborados de metal no clasificado previamente (n.c.p)
2811	Productos intermedios	Fabricación de motores, turbinas y partes para motores de combustión interna
2819	Productos intermedios	Fabricación de maquinaria de uso general
2821	Productos finales	Fabricación de maquinaria agrícola y forestal
2822	Productos finales	Fabricación de máquinas formadoras de metal y de máquinas herramienta
2823	Productos finales	Fabricación de maquinaria para metalurgia
2824	Productos finales	Fabricación de maquinaria para la explotación de minas y canteras
2825	Productos finales	Fabricación de maquinaria para la elaboración de alimentos, bebidas y tabaco
2826	Productos finales	Fabricación de maquinaria para la elaboración de textiles, prendas de vestir y artículos de cuero
2829	Productos finales	Fabricación de otros tipos de maquinaria y equipo de uso especial no clasificado previamente (n.c.p)
2910	Productos intermedios	Fabricación de vehículos automotores y sus motores
2920	Productos intermedios	Fabricación de carrocerías para vehículos automotores, fabricación de remolques y semirremolques
2930	Productos intermedios	Fabricación de partes, piezas (autopartes) y accesorios (lujos) para vehículos automotores
2963	Productos finales	Artículos de diferentes usos
3290	Productos finales	Otras industrias manufactureras no clasificadas previamente (n.c.p)
3311	Servicios	Mantenimiento y reparación especializado de productos elaborados en metal
3312	Servicios	Mantenimiento y reparación especializado de maquinaria y equipd

Figura 1. Clasificación CIUU [DIAN]

En Boyacá, el sector metalmecánico contribuye el 40% de la Fabricación Nacional, posicionando al departamento en un lugar destacado, en esta industria a nivel nacional; lo anterior en parte a que el Departamento cuenta con una producción representativa de recursos naturales. Este sector suministra el 16% del PIB regional, dinamizando a los sectores destacados de la evolución socioeconómica del Departamento [16].

En la Tabla 1 se presentan los lineamientos que estructuran el actuar del gobierno y el que hacer de las entidades y organizaciones en busca de la productividad como una acción pensada, conjugada y articulada entre los diferentes actores, siendo de interés oficial, del sector de la producción y de los colombianos, ya que con ella se logra calidad de vida integral que beneficia a todos.

Tabla 1. Lineamientos gubernamentales

Norma y/o Programa	Descripción
Fábricas de la Productividad	Buscan Incrementar la productividad interna de las empresas, a través de asistencia técnica en temas como productividad operacional, productividad laboral, gestión comercial, calidad, eficiencia energética, transformación digital, logística, sostenibilidad ambiental, y desarrollo y sofisticación de producto, brindada por consultores expertos (extensionistas) para el mejoramiento de la competitividad de las empresas [17].
Agenda Nacional de Competitividad	En la Línea Temática PND Transformación empresarial: desarrollo productivo, innovación y adopción tecnológica para la productividad, con el producto Estrategias de desarrollo empresarial implementadas en Mipymes [18].
Ley 590 de 2000	Desarrollos de leyes para el apoyo a las micro, pequeñas y medianas empresas, en el capítulo IV y VI [19].
El CONPES 3866 de 2016 con la Política Nacional de Desarrollo productivo	Esta política define lineamientos para implementar una estrategia de priorización de apuestas productivas a nivel departamental; el uso exclusivo de los instrumentos sectoriales de desarrollo productivo del Gobierno nacional busca promover activamente su transformación y diversificación [20].
Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 (PND)	Fortalece a través del Pacto por la productividad y la equidad en las regiones con el Centro de innovación y nodo logístico, la integración productiva nacional e internacional [21].
iNNpulsa Colombia en 2012.	Agencia de emprendimiento e innovación del Gobierno Nacional, junto al Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, acompaña la aceleración de emprendimientos de alto potencial y a los procesos innovadores y de financiación [22].
Ley 1253 del 27 de noviembre de 2008	Por el cual se regula la productividad y competitividad y se dictan otras disposiciones [23].
CONPES 3668 de 2017	Informe de seguimiento a la política Nacional de Competitividad y Productividad [24].

3. MÉTODO

En la presente investigación se asumió las fuentes del crecimiento de la productividad planteados por [25]: 1) Reasignación de factores de producción entre empresas y sectores, 2) Mejora en el desempeño de las empresas, 3) Mayor productividad de las empresas entrantes y salida de las empresas de baja productividad, tomados como antecedente teórico para esta investigación y que fueron utilizados en [26]. En la Figura 2 se muestra de forma manifiesta dichos sustentos, donde se evidencia la importancia para el posterior análisis.



Figura 2. Fuentes de crecimiento de la Productividad [25]

El tipo de investigación es descriptiva no experimental, se ejecutó la estrategia metodológica del análisis documental con base en los informes y estudios elaborados sobre la productividad del sector Metalmeccánico Nacional y Regional, donde los parámetros o filtros utilizados en los motores de búsqueda, fueron documentos que cumplieran los siguientes requisitos:

1. Refirieran el Sector Metalmeccánico y manejarán información en el Contexto Nacional y Regional.
2. Resultados con mayor citación y que son las aproximaciones teóricas sobre los factores, que influyen en la productividad del Sector Metalmeccánico, para posteriormente convertirse en descriptores.
3. Referencias que se encuentren en el Intervalo de tiempo de la publicación de los informes y/o estudios: 2015-2020.

Identificándose de forma estructural y agrupándolos por las fuentes de crecimiento de la productividad, como se indica en la Tabla 2. Para efectuar el análisis documental se realizaron las siguientes acciones:

1. Indización: Donde se caracteriza y representa el contenido utilizando las palabras y los descriptores, por extracción.
2. Descripción sustancial: Se realiza la representación abreviada de un contenido, manejando el resumen selectivo en el cual se muestra solo las partes del documento que son fundamentales para el tema tratado.
3. Análisis crítico: Donde se logra la clasificación de los documentos y su análisis y síntesis [27].

Tomando como unidad de análisis cada documento; como universo de muestra: Artículos, tesis y estudios institucionales del sector Metalmeccánico, desde el contexto nacional y luego desde el contexto regional; se utilizó

como campo de búsqueda base de datos Google académico y Open Journal Systems, entre los cuales se cuenta con artículos de revistas científicas y con informes de entidades gubernamentales con indagación altamente fidedigna de los años 2015 hasta el 2020.

Tabla 2. Agrupación descriptores determinados

Fuentes de crecimiento de la productividad	Descriptores	Concepto
Reasignación de factores de producción entre empresas y sectores	Manejo Contexto operacional productivo	Es tener claro entendimiento de la realidad y evidencia en la que funciona el equipo y/o proceso.
	Metodologías de calidad	Técnicas que contribuirán a efectuar los elementos primordiales y a que el establecimiento del sistema de calidad sea beneficioso para la Organización [28].
	Mejoras Tecnológicas	La innovación tecnológica, está determinada por el agregado de modificaciones tecnológicas en los transformaciones, mercancías o métodos que implican una cadena de acciones acreditadas, especializadas, empresariales, bancarias, productivos y lucrativos que genera valor incorporado [29].
Mejora en el desempeño de las empresas	Eficiencia	La medición de la eficiencia es un elemento primordial para toda organización ya que analiza el nivel de los resultados alcanzados y los recursos utilizados para alcanzarlos [30], generalmente se incurre en algún tipo de confusión cuando se intenta calificar el nivel de eficiencia y no se tienen en cuenta los resultados y los recursos [10].
	Experiencia del TH	El manejo de capacidad de los colaboradores, es un instrumento que no tiene precio en el área de negocios, que permite tutelar y gestionar el talento de las personas, tiene ahínco en que este potencial no es tan accesible, tampoco de cambiar, por el contrario, es fundamental para cimentar una empresa de éxito, siendo esto un instrumento que colabora a encontrar personal apto [31].
	Materias primas	Garantizar insumos y proveedores, los cuales estén con estándares de calidad hace que la eficiencia de los procesos sea alta; construyendo Alianzas estratégicas con el proveedor, para el suministro de materia prima de calidad [32].
	Capacidad innovadora	Cuando la organización direcciona, la mayoría de sus dineros a la generación de nuevo conocimiento que provee en el tiempo el desarrollo de productos, formas de hacer los productos y servicios para mejorar significativamente a toda la [33].
Mayor productividad de las empresas entrantes y salida de las empresas de baja productividad	Entorno competitivo	Forma sistémica de todo lo que rodea externamente la organización en cuanto al mercado y posibilidad de penetración del mercado, en la dinámica contextual en que la organización se desenvuelve [10].
	Eficacia	Etapa en la que una empresa logra sus objetivos planeados establecidos, es decir es la guía que demuestra la capacidad que tiene la industria para obtener los efectos deseados [10].

Para un total de 22 fuentes documentales seleccionadas, el análisis de estos documentos se realizó con la ayuda de los descriptores y tomando las siguientes preguntas cómo ítems de evaluación en cada documento, los cuales están en concordancia con las tres fuentes de crecimiento de la productividad, fundamento teórico de esta investigación: ¿Se está realizando reasignación de factores de producción entre empresas y sectores? ¿Se está ejecutando acciones de mejora en el desempeño de las empresas y a través de qué aspectos? ¿Se está identificando mayor productividad de las empresas entrantes y salida de las empresas de baja productividad?

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 3 se presenta el consolidado de las referencias documentales objeto de análisis, que resultaron a la luz de la verificación de los filtros mencionados en el diseño metodológico.

Tabla 3. Fuentes documentales analizadas

	Ideas esenciales sobre el tema de interés
[9]	Para que Colombia tome un camino de evolución firme y que minimice su relación directa con los capitales nativos, es fundamental potenciar la productividad a través de cambios que se embarquen en una senda de crecimiento más sólido, es fundamental procurar la productividad a través de la adopción de reformas orgánicas en el manejo de la competencia, control, lineamientos productivos, desarrollo civil, invención y destrezas.
[34]	La PTF Productividad total de los factores se refiere a la productividad que no se modifica respecto al canje en la capacidad de la usanza de los componentes de producción. Por el contrario, las dinámicas de la PTF manifiestan un diferencial en la fabricación partiendo de una mixtura fija de los elementos de los procesos productivos. Entonces, productores con una altura superior de PTF logran cuantías mayores de fabricación con igual unido de insumos
[35]	Evidencia cuales son las mejoras para posicionar el sector metalmeccánico dentro de nuevos mercados generando productos con base innovadora y la sofisticación de estos, además de realizar un análisis sobre su estructura empresarial dentro de nuestro país con el fin de definir las áreas y puntos favorables como lo son la proveeduría, transformación y comercialización. Con un 72% conformado por las pymes, el 6,1% grandes compañías, se encuentra la transformación con un 24,5% y finalmente la de proveeduría cuya participación es del 7,5%.
[36]	La Industria Metalmeccánica es el pilar para que otros sectores se desarrollen y fortalezcan la red productiva de un país; cuenta el ámbito de conocimientos propios sobre una técnica y el plus productivo. Se puede afirmar que la nación con un progreso significativo en cuanto al desarrollo manufacturero evolucionado presenta una fortaleza en el sector metalmeccánico.
[26]	Se debe encauzar la estrategia de emprendimiento a contextos posibles que ayuden a transformar la actual visión que se tiene respecto al tamaño de la empresa y sus formas de crecimiento. Perfeccionar la eficacia y capacidad para salir bien librados en una comparación internacional sobre demografía y dinámica empresarial en Colombia. Así también hacer rastreo habitual de agudo horizonte a los CONPES de formalización empresarial, evolución productiva.

[1]	El CPC ha enfatizado la importancia de entender los determinantes del factor central del crecimiento económico: la productividad. Mientras que la competitividad hace referencia a la capacidad de las empresas de competir en los mercados doméstico y exterior, la productividad se refiere a la capacidad de una economía, de un sector y de una empresa de generar valor agregado por la vía de mayor eficiencia en producción.
[3]	La estrategia de firma explora en la labor dentro de las organizaciones, que es donde se establece esencialmente la productividad. Pero esta la otra línea que se orienta en mejorar los contextos para que toda organización logre salir a flote, esencialmente con las directrices del gobierno.
[37]	Se observa un estacionamiento en la incubación de cuantía económica adicional, el pago a la mano de obra y una reveladora disminución en las plantas de personal y compañías industriales. El potencial laboral desanda mientras los requerimientos de acero en la nación crecen. El coeficiente de Penetración de Transacciones con el extranjero ve creciendo al 69% y el registro de la balanza comercial alcanzó el 0,34, señalando que Colombia trae esta clase de productos de afuera en un alto porcentaje.
[38]	Se identifican dos formas de organización de la producción metalmecánica. La producción continuada o en línea que se caracteriza por producir gran cantidad de productos homogéneos o la producción discontinua en la cual se producen por grupos pequeños o chicos o mercancías particulares. El sector metalmecánico en Colombia demanda del acogimiento de los dos prototipos de conjunto de técnicas citados anteriormente.
[7]	La Curva de aprendizaje está concebida como la armonía del trabajador y la forma de realizar un proceso productivo. Diseño del producto: propósito minucioso que da respuesta a requerimientos de una sociedad de consumo. Mejora en los métodos de trabajo: Conjunto de acciones de perfeccionamiento, formulación para hacer cada vez mejor un proceso productivo. Mejoras tecnológicas: Aquellos atributos con que se cuentan a través de la utilización de los últimos avances de un conjunto de técnicas.
[10]	El aporte a la productividad por parte de los materiales, se logra con una adecuada selección de ellos y la elaboración de productos útiles y por unidad de material o energía utilizada, sin embargo, la eficacia de la materia prima, dependiendo de un proceso optimizado donde este tenga cierto grado de flexibilidad, en ese aspecto autores como (Bortesi, 2008) afirman que de una adecuada materia prima se garantiza la calidad en el proceso y todo lo que esto impacta.
[39]	Las directivas de las Organizaciones, deben jalonar el liderazgo de los bosquejos y ejecución de tácticas focalizadas en la estructuración y empoderamiento de la estrategia Kaizen con el fin de lograr sus planes decisivos conducentes a fortalecer la productividad y decrecimiento de costos.
[40]	Las empresas del sector metalmecánico en Boyacá, proveen mercancías con mínimo importe adherido, existe poca modernización en los procedimientos y productos, permanece la misma forma de hacer los productos con pocos niveles de evolución. El resarcimiento de los productos es mínimo con respecto a los gastos necesarios para producir y mercantilización. La calidad no es un factor importante en las pequeñas y medianas empresas.
[41]	La productividad de las empresas, se debe al manejo interno en cada una de ellas, invirtiendo en ciencia, tecnología e innovación, cooperando en la especialización de su recurso humano. Para que se dinamicen estos procesos es importante el apoyo en régimen tributario que pueda brindar el gobierno.
[42]	Los sistemas de mejora continua hacen que aumente la productividad y competitividad al interior de las empresas, sin embargo, presentan falencias e inconsistencias en las empresas del sector metalmecánico debido a la falta de documentación, y retrasos en su desarrollo. Es importante realizar la caracterización de los procesos e identificar los pasos esenciales para implementar un sistema de mejora continua y así lograr una validación de su impacto.
[43]	Respecto a la Sofisticación del proceso productivo, se considera la transformación de los factores de producción intensivos en eficacia laboral (menos complejos) y los que emplean a la última tecnología (muy sofisticados). Entre las naciones analizadas, Suiza es la que cuenta con procesos productivos con mayor sofisticación, con un puntaje de (6,54), en divergencia con los menos rebuscados de Rumania que obtuvo (3,43)
[44]	Las buenas prácticas de calidad, sin importar cuál sea aplicada en la organización, permitirá adaptar el capital provechoso, ya que se puede reducir los costos de fabricación y se puede lograr una optimización de los costos de los productos fabricados para el cliente, permitiendo aumentar la productividad e igualmente la competitividad. Estos procesos de calidad no son estáticos, deben ser aplicados de forma dinámica y según lo que la organización requiera.
[45]	El sector metalmecánico enfrenta diversos cambios en la demanda, por esta razón es importante replantear su estructura de negocio, enfocándose en sus clientes, y así adaptar su producción. Teniendo presente la eficiencia y sostenibilidad que imponen las restricciones y regulaciones Ambientales. Acoplar igualmente las tecnologías de la información, permitirá mejorar la respuesta al nuevo contexto empresarial.
[38]	El sector metalmecánico, es uno de los que se ve afectado debido a la no aplicación de nuevas tecnologías, ya que muchas de las empresas son pequeñas y medianas, haciendo imposible adquirirlas. Estas tecnologías son de tipo universal y específicas que utilizan las empresas, según el tipo de organización y producto terminado. Muchas de ellas no se conocen o no están al alcance económico; por esta razón el sector sigue utilizando sus procesos de forma rudimentaria y artesanal.
[46]	El sector metalmecánico está basado en la transformación de materia prima, en la elaboración de productos mediante la aplicación de técnicas y procesos complejos. Para lo cual es necesario aplicar tecnología y automatización, que para muchas empresas dificulta su planeación estratégica, por esta razón, se han logrado alianzas entre empresas del sector, consolidando un clúster metalmecánico que permite colaborar y cooperar entre ellas, con el fin de robustecer su competitividad.
[47]	El factor fundamental para la productividad en la empresa es la aplicación del Modelo Kaizen, permitiendo en toda la cadena del valor obtener calidad. En el departamento de Boyacá, es muy baja la aplicación del modelo ya que el producto final no presenta valor agregado y el en proceso productivo se evidencia una alta presencia de mudas, lo que genera un aumento en pérdidas, desplazamientos, reprocesos; afectando en gran medida su productividad.
[48]	El nivel de cumplimiento en las Normas de competencia laboral, incide en la competitividad del sector metalmecánico. Igualmente certificar en competencias laborales a los miembros de las empresas, y mejorar las condiciones de trabajo incentiva la calidad y motiva la cultura del aprendizaje entre sus colaboradores. En el departamento de Boyacá este nivel es muy bajo, casi nulo, evidenciando un alto nivel de rotación de personal, afectando directamente a la eficiencia y productividad.

Como resultado del análisis crítico ejecutado a las anteriores investigaciones, en cuanto a las fuentes de crecimiento de la productividad y con la reagrupación realizada para el presente estudio, las cuales se tomaron como ítems de valoración, se logró la información que se muestra en la Figura 3.

De la información analizada, se obtuvo que el 50% de las fuentes documentales hacen referencia significativa al manejo del contexto operacional, donde se resalta que una adecuada combinación de los factores de producción, puede producir una cota superior, generando más manufactura con el mismo acumulado de insumos; sin embargo, se destacan que aunque al interior del país los procesos productivos del sector metalmecánico tienen capacidad competitiva, la mayoría de las organizaciones aún tienen procesos tradicionales.

Fuentes de crecimiento de la Productividad	Factores de Producción (Descriptores por extracción)	Número de referencias que incluyen el descriptor	%
Reasignación de factores de producción entre empresas y sectores	Manejo Contexto operacional - productivo	11	50
	Metodologías de calidad	12	55
	Mejoras Tecnológicas	9	41
Mejora en el desempeño de las empresas	Eficiencia	9	41
	Experiencia del TH	11	50
	Materias primas	6	27
	Capacidad innovadora	10	45
Mayor productividad de las empresas entrantes y salida de las empresas de baja productividad	Entorno competitivo	10	45
	Eficacia	5	22

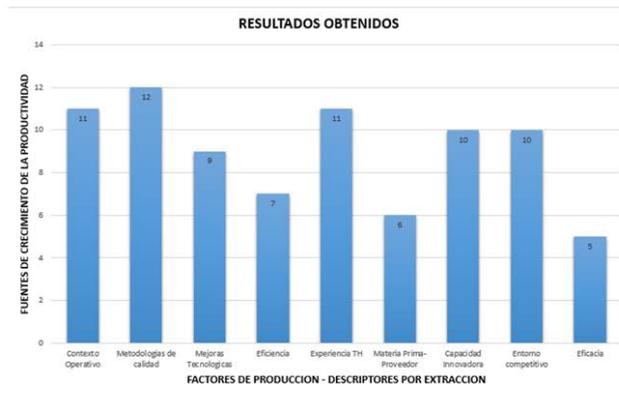


Figura 3. Síntesis de resultados

Uno de los principales factores, que tanto el sector gubernamental como el empresarial analizan y toman en cuenta son las metodologías de calidad, que incluyen toda la gestión organizacional para el mejor provecho del sector; con relación al factor de producción mencionado, se obtuvo el 55% de los estudios analizados señalan la calidad y su relación con la labor diaria, como elementos fundamentales en todo el proceso productivo, evitando desperdicios, reprocesos, re-inspecciones, y disminución de costos; en contraste los restantes estudios señalan que para algunas empresas la calidad y su gestión, son consideradas como un costo, más no como una inversión.

En lo que concierne a la mejora tecnológica, se obtuvo que el 41% de los resultados, la consideran necesaria para aumentar la capacidad de competir del sector metalmecánico, a través de estrategias comerciales fundamentadas en calidad y nuevas tecnologías que sean evidentes en la satisfacción de clientes finales, fortaleciendo la cadena a partir de un avance en los procesos, con la mejor estructuración de los mapas de flujo de valor; las mejoras tecnológicas deben fortalecer el sistema de información que robustezcan el proceso productivo, la interacción con sus trabajadores; así como la diversificación de los productos y servicios. La inversión en mejoras tecnológicas debe ser considerada una acción estratégica para lograr mayor penetración en el mercado, poder de negociación con los clientes y proveedores. Es importante considerar tecnologías relevantes que no requieren grandes esfuerzos económicos como lo son la realidad aumentada y/o la realidad virtual.

En el análisis de resultados se encontró que el 32%, mencionan a la eficiencia como un factor de la productividad; es importante destacar que no se tienen en cuenta en todos los estudios indicadores que permiten medir o identificar los resultados de los procesos, a partir de una política organizacional fundamentada en la utilización baja de recursos. Respecto al talento humano, se encontró que tiene un alto grado de injerencia en los resultados de producción con el 50%, donde se considera a este factor como parte activa e importante para la generación de valor agregado a la productividad; efectuar estudios integrales laborales, que incluye la caracterización de los puestos de trabajo, la identificación de perfiles, funciones y/o ocupaciones, que ayudan a diseñar los criterios selección, para lograr concentrar capital humano calificado; lo mencionado anteriormente, siendo conocido por el sector no es aplicado, pero se evidencia que las organizaciones que si lo realizan, logran mayor autogestión, potencializan las habilidades, competencias y fortalecen la productividad del conocimiento que redundan en generación de valor agregado.

Lo que refiere a materias primas y relación con proveedores, solo el 27% toman en cuenta este factor como elemento fundamental que aporta en directa proporción a la eficiencia de los procesos y destacan los beneficios del poder de negociación y/o alianzas estratégicas con los proveedores; dicho de otra manera, es necesario que el proveedor garantice a partir de un sistema estandarizado de calidad insumos, entregas en los tiempos requeridos, aportando oportunidad y flexibilidad financiera para la organización.

Mientras que el 45% de los estudios señalan a la innovación, como de vital importancia en el Crecimiento empresarial y desarrollo productivo, fomentando la participación y vinculación de mejoramientos en métodos, procesos y máquinas. De hecho, para aumentar la capacidad innovadora y la competitividad es necesario dar mayor impulso a la participación que tienen los investigadores en los diferentes sectores, ya que las instituciones de educación superior son las que tienen mayor vinculación de investigadores; entonces, se evidencia que el impacto de la entrega y uso de ciencia y tecnología (TCT) es casi nulo, generándose una brecha en este sentido, sin tener en cuenta lo fundamental de la transmisión del conocimiento al sector productivo y a la sociedad.

Con respecto al entorno competitivo, el 45% de los estudios analizados señalan que es de vital importancia lograr mayor participación en el mercado, generando sostenibilidad en el tiempo, así también dan prioridad a redireccionar desde una objetiva identificación, las Organizaciones de menor productividad para que tengan a bien, un cierre con apoyo del estado, o tengan oportunidades para poder reinventarse a nuevos mercados. Finalmente, solo el 22% de las fuentes indagadas tienen en cuenta la eficacia, sin embargo, en estas se demuestra lo importante aplicarla como directriz que debe tener toda Organización para evaluar y/o controlar la consecución de los objetivos establecidos.

5. CONCLUSIONES

Esta investigación permite identificar el nivel de estudio de los factores que influyen en la productividad de una organización y sectorialmente, unos en un alto grado y otros no. Se considera que todos deben tenerse en cuenta, o asociarlos unos con otros y resaltar la utilización de indicadores de efectividad y eficiencia, que permitan realizar una trazabilidad en las organizaciones.

La empresa Metalmecánica en Colombia, tiene como perspectiva los desarrollos encausados a la producción de partes de avión, barcos y moldes. A nivel de innovación y avances tecnológicos es necesario hacer mayores esfuerzos en cuanto a la sofisticación de los procesos de producción y manejo eficaz de tecnologías oportunas, lo anterior para fortalecer la capacidad competitiva del sector y a su vez continuar con el aporte que hace al PIB, buscando un crecimiento modesto pero sostenido al mismo. La desaceleración de la construcción e infraestructura entre otros, es un contexto que afecta a este sector ya que son demandantes del mismo, de manera análoga, otro elemento que tiene un impacto altamente negativo son las materias primas adquiridas en dólares.

No obstante, son de destacar como fortalecidos los factores referentes al talento humano, que presenta un nivel de ingreso promedio y un gran porcentaje de ocupación, sin negar que tiene incidencias no tan positivas como la alta rotación de personal y la falta de contratación laboral. De otra parte, las metodologías de Calidad, con la pertinente aplicación de la gestión, contribuyen a que la dinámica del sector sea propicia para generar valor agregado.

El departamento de Boyacá gracias a su composición geográfica, su subsuelo permite la extracción de una gran cantidad de mineral, en consecuencia, se da el proceso de extracción, refinamiento y de fundición, con la participación de grandes industrias que trabajan el hierro y el acero, igualmente industrias carroceras y de transporte, logrando que este sector sea de gran importancia para el comercio, transporte, construcción, entre otros; permitiendo el dinamismo de la economía en el departamento. No obstante, es importante aclarar el abismo en el cual se encuentran las Pymes del departamento con respecto a las grandes empresas, ya que su desarrollo tecnológico no es el adecuado, y su capacidad organizacional no está preparada para afrontar el avance de los retos de las demandas.

REFERENCIAS

- [1] Consejo Privado de Competitividad. (2019). Informe nacional de competitividad 2018-2019. Consejo Privado de Competitividad. Recuperado: https://compite.com.co/wp-content/uploads/2018/10/CPC_INC_2018-2019_Web.pdf
- [2] Krugman, P. (1994). *The age of diminishing expectations*. MIT Press.
- [3] Consejo Privado de Competitividad. (2016). Productividad, la clave del crecimiento para Colombia. Consejo Privado de Competitividad y Universidad de los Andes. Recuperado: https://compite.com.co/wp-content/uploads/2016/07/CPC_Productividad-WEB.pdf
- [4] Oficina de estudios económicos. (2020). Información: Perfiles Económicos Departamentales. Ministerio de Comercio. Recuperado: <https://www.mincit.gov.co/CMSPages/GetFile.aspx?guid=4bebf02-33f4-48a2-be6d-ce426752f76d>.
- [5] Sanchez, J. y Bonilla, Y. (2011). Medición de la productividad por el método del valor agregado (MPVA) a las Pymes de familia del sector industria de la ciudad de Bogotá. Recuperado: <http://congreso.investiga.fca.unam.mx/docs/xvi/docs/1Z.pdf>.
- [6] Galindo, M. y Ríos, V. (2015). Productividad en Serie de Estudios Económicos, 1, México DF: México ¿cómo vamos? Recuperado: https://scholar.harvard.edu/files/vrios/files/201508_mexicoproductivity.pdf
- [7] Anaya, J. y Tejero, J. (2017). Organización de la producción industrial: Un enfoque de gestión operativa en fábrica, ESIC Editorial. Recuperado: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/unadsp/detail.action?docID=5885869>
- [8] Raya, M. y Núñez, R. (2014). La productividad, un pilar importante en la ventaja competitiva de las organizaciones: una perspectiva para la gestión de los factores que influyen en la productividad empresarial. *Portal de la Ciencia* 7, 77-88.
- [9] OCDE. (2019). Estudios Económicos de la OCDE: Colombia 2019. OECD Publishing.
- [10] Fontalvo, T., De La Hoz, E. y Morelos, J. (2017) La productividad y sus factores: Incidencia en el mejoramiento organizacional. *Dimensión Empresarial* 15(2), 47-60.
- [11] Bortesi, L. (2008). Aspectos cualitativos de la productividad. *Revista alternativa Financiera*, 5 (5), 7-15.
- [12] González, J., Ochoa, E. y Gary, A. (2018). Estado actual de la internacionalización de las Pymes del sector metalmecánico de Cartagena. *Revista Orbis* 14(41), 33-51.
- [13] Druker, P. (1999). Knowledge-Worker Productivity: The biggest challenge. *California Management Review* 41 (2), 79-94.
- [14] Nagles, N. (2006). Productividad: Una propuesta desde la gestión del conocimiento. *Revista Escuela de Administración de Negocios* (58), 87-106.
- [15] DANE. (2020). Producto Interno Bruto (PIB). Boletín Técnico Producto Interno Bruto (PIB) IV Trimestre de 2019.
- [16] Comisión Regional de Competitividad Boyacá. (2019). Agenda Integrada de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación de Boyacá. Recuperado: <https://www.boyaca.gov.co/sectic/files/Agenda-Departamental-Competitividad-Innovacion.pdf>.
- [17] Fábricas de productividad. (2020). ¿Qué es fábricas de productividad? Recuperado: <https://www.ccc.org.co/landing/fabricas-de-productividad/>
- [18] Sistema Nacional de Competitividad e Innovación. (2020). Agenda Nacional de Competitividad e Innovación 2019-2022.
- [19] Congreso de Colombia. (2000). Ley 590 de 2000. Por la cual se dictan disposiciones para promover el desarrollo de las micro, pequeñas y medianas empresa.
- [20] CONPES. (2016). CONPES 3866. Política nacional de desarrollo productivo. Consejo nacional de política económica y social.
- [21] Departamento Nacional de Planeación. (2018). Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022.

- [22] INNpalsa Colombia. (2020). Nosotros. Recuperado: <https://innpulsacolombia.com/nosotros>
- [23] Congreso de Colombia. (2008). Ley 1253 de 2008. Por la cual se regula la productividad y competitividad y se dictan otras disposiciones.
- [24] CONPES. (2017). CONPES 3668. Informe de seguimiento a la política nacional de competitividad y productividad ley 1253 de 2008. Consejo Nacional de Política Económica y Social.
- [25] Cusolito, D. y Maloney, J. (2018). Competitividad e Innovación. Resumen ejecutivo. Recuperado: https://compite.com.co/wp-content/uploads/2019/11/CPC_INC_2019-2020_Resumen_ejecutivo.pdf
- [26] Consejo Privado de Competitividad. (2020). Informe nacional de competitividad 2019-2020.
- [27] Castillo, L. (2005). Análisis documental. Biblioteconomía. Recuperado: <https://www.uv.es/macass/T5.pdf>.
- [28] Climent, S. (2003). Los costes de calidad como estrategia empresarial en las empresas certificadas en la norma ISO 9000 de la CV. Universidad de Valencia.
- [29] Velázquez, G. y Salgado, J. (2016). Innovación tecnológica: un análisis del crecimiento económico en México (2002-2012: proyección a 2018). *Análisis Económico* 21(78), 123-132.
- [30] Martín, N., Gómez, J. y Pérez V. (2007). El deleite de la Eficiencia. *Universia Business Review* 14, 56-67.
- [31] García, G. y Rovira, M. (2017). La Gestión del Talento Humano y su impacto en los procesos de producción y servicios postventa de una empresa de servicios tecnológicos. Recuperado: <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/ec/2017/talento-humano-produccion.html>
- [32] Salas, K. et al. (2019). Evaluación de la Cadena de Suministro para Mejorar la Competitividad y Productividad en el Sector Metalmeccánico en Barranquilla, Colombia. *Información tecnológica* 30(2), 25-32.
- [33] Impulsa Colombia. (2017). Reto de la productividad Parte I. Impulsa Colombia.
- [34] DANE. (2020). Dirección de síntesis y cuentas nacionales, productividad total de los factores. Recuperado: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/productividad/doc-metodologico-productividad-cuentas-nal-2019.pdf>.
- [35] Bancoldex. (2018). Diversificación Inteligente: Posibilidades de diversificación y sofisticación de la Industria Metalmeccánica en Colombia. Recuperado: https://www.bancoldex.com/sites/default/files/documentos/perfil_industrial_metalmecanica.pdf.
- [36] Guerrero, B. y Cruz, J. (2018). Escenarios futuros del sector metalmeccánico. Municipio de Tuluá y su zona de influencia. Horizonte 2018-2028. *Informador Técnico Colombia*. Recuperado: <http://doi.org/10.23850/22565035.1408>.
- [37] Cedetrabajo. (2016). Informe SIA # 23. La industria metalmeccánica en Colombia frente a los TLC. Recuperado: <https://cedetrabajo.org/blog/informe-6-la-industria-metalmeccanica-en-colombia-frente-a-los-tlc/>
- [38] Argote, M. y Parra, L. (2016). Marco conceptual para el análisis de brechas tecnológicas en el sector metalmeccánico. Universidad EAN.
- [39] Zambrano, O. (2017). Mejora continua en productividad organizacional y su impacto en colaboradores. Recuperado: <https://doi.org/10.17081/dege.10.2.3033>.
- [40] Ormet-Boyacá. (2015). Estudio prospectivo para el sector metalmeccánico en Boyacá. Aplicación de la metodología cualitativa de prospectiva laboral. Recuperado: <https://www.oitcinterfor.org/node/6823>.
- [41] Albis, N. et al. (2017). Evaluación de políticas públicas de apoyo a la innovación sobre la productividad de las empresas manufactureras y de servicios en Colombia. Recuperado: <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1280>.
- [42] González, J. y Dueñas, D. (2020). Diseño metodológico para la caracterización de procesos, caso empresas metalmeccánicas del departamento de Boyacá. *INGE CUC* 16(1), 45-62.
- [43] Pozueta, J. (2017). Intensidad de la competencia y grado de sofisticación en los negocios: un análisis multivalente. Trabajo de grado. Universidad Pública de Navarra.
- [44] López, D. (2016). Factores de calidad que afectan la productividad y competitividad de las micros, pequeñas y medianas empresas del sector industrial metalmeccánico. *Revista entre Ciencia e Ingeniería* 10(20), 99-107.
- [45] INNpalsa-Andi. (2018). Cierre de brechas de innovación y tecnología. Recuperado: <http://www.andi.com.co/Uploads/Estudio%20Cierre%20de%20Brechas%20Innovacion%20y%20Tecnologia-ilovepdf-compressed.pdf>
- [46] Cortes, V. y Valencia, L. (2018). Planeación estratégica de las pymes del sector metalmeccánico. AREANDINA.
- [47] Contreras, E., Zambrano, D. y Vaca, Y. (2018). Análisis de mudas en el sector metalmeccánico de Boyacá-Colombia. *Revista Espacios* 39 (16), 30-40.
- [48] Carreño, C., González, M. y Patarroyo, N. (2016). Diagnóstico del Nivel de Capacitación del Personal Vinculado al Sector Siderúrgico y Metalmeccánico de Boyacá respecto a las Normas de Competencia Laboral. *Revista científica* 4(27), 382-394.

Aplicación de la metodología de modelado de procesos de negocio BPM en el análisis de desempeño de los servicios hospitalarios quirúrgicos

Elisa del Carmen Navarro Romero
Óscar Mauricio Gelves Alarcón
Helien Parra Riveros
Universidad Santo Tomás
Colombia

Son muchos los campos en los cuales la aplicación de una metodología BPM, ha mostrado resultados, especialmente en procesos productivos y de servicios, al integrar en el modelo herramientas de mejoramiento que lo apalancan y robustecen, como una herramienta eficiente para el mejoramiento, entre las que podemos mencionar, Kaizen, Reingeniería de procesos de negocio (BPR), Direccionamiento total de la calidad (TQM), Seis Sigma (6σ), Productividad total (TP), entre otros. Una vez comprendido los procesos, se detallarán y analizarán los indicadores de calidad y eficiencia, que intervienen en el desempeño de los servicios hospitalarios. Definir una buena calidad en los servicios de salud, es una tarea compleja ya que ésta es un atributo para el que cada paciente o usuario califica de acuerdo a su percepción. Este capítulo explora desde la revisión bibliográfica preguntas asociadas a ¿qué es un proceso de negocio, BPM? ¿cuáles son sus beneficios en el sector salud? ¿cómo el uso del modelado BPM, mejora el desempeño de los servicios quirúrgicos en hospitales de alta complejidad?, con la finalidad de proponer un modelo de mejoramiento basado en la metodología BPM, a la medida del sector hospitalario quirúrgicos, teniendo en cuenta sus variables de forma particular. Es importante comprender que éstos servicios hospitalarios implican el desarrollo de diferentes tareas, donde intervienen varios actores, lo que los convierte en procesos dinámicos y complejos, por lo que se evaluará el impacto de utilizar metodologías de optimización, modelamiento y de reingeniería en los servicios hospitalarios.

1. INTRODUCCIÓN

La metodología de Gestión de Procesos de Negocio (Business Process Management BPM) se ha consolidado como modelo de gestión organizacional por excelencia, convirtiéndose en una filosofía adoptada en las organizaciones que buscan una proyección, sostenibilidad y permanencia hacia el futuro, debido a su capacidad para responder a las necesidades del cliente, las expectativas del entorno, los retos de los competidores, y los desafíos que plantea la globalización desde los avances tecnológicos. Por medio del modelado de procesos de negocio, las organizaciones optimizan sus procesos, a través de una arquitectura robusta y automatizada. De igual forma, han logrado mayor transparencia y mejor cumplimiento en su promesa de valor, teniendo como eje central la mejora continua [1].

La mayoría de las aplicaciones de esta metodología, se orientan a mejorar procesos productivos, financieros y comerciales, perfilándose como una herramienta para aumentar la eficiencia del negocio, los procesos y generar ventajas competitivas en el sector, buscando mejorar la percepción de los usuarios, generar bienestar, eficiencias y reducir la variabilidad en el nivel de calidad en éstas actividades [2]. En el escenario de los servicios, las tendencias y utilidades del BPM promueven que los empleados participen en las decisiones corporativas, trabajen de forma sinérgica, logren resultados y satisfacciones personales por medio de una coordinada gestión del cambio [3, 4] y facilita la gestión del conocimiento, al promover las interacciones transversales de carácter como flexible, rápido e innovador al interior y entre organizaciones como elemento promotor del mejoramiento continuo [5].

Los procesos en las organizaciones son elementos constructores que permiten alcanzar los lineamientos organizacionales, y cumplir adaptativamente con los requerimientos de los clientes que se caracterizan por ser lineales, consecutivos, coherentes y ágiles [6], por lo que podría afirmarse que la manera como éstos se gestionan en los procesos de negocio representa el ADN de las organizaciones [7]; es decir, en un sentido metafórico la molécula que contiene las instrucciones necesarias para que una organización pueda desarrollarse, auto-gestionarse *reproducirse*, mejorarse, expandirse, *reproducir* y reinventarse para sobrevivir o *crear vida*, la manera como se interrelacionan todos sus componentes o procesos, por medio de un *código organizacional* [8], que es la manera como se integran los procesos de manera sistemática con la estrategia o directriz, los sistemas de gestión, el recurso humano y los apoyos tecnológicos [9].

Es de reciente interés la aplicación de ésta metodología en la gestión hospitalaria donde no sólo es importante el servicio que se presta (resultado), sino también la manera como se está prestando el servicio (procesos). La oportunidad, comunicación coherente y seguridad del paciente son aspectos que los hospitales pretenden mejorar continuamente [10]. De manera particular, la prolongación indefinida de los tiempos de espera para la realización de atenciones y procedimientos son un tema sensible para la población e incide en la calidad de la atención a nivel de percepción y en la eficacia de los tratamientos. La cadena de atención del paciente se caracteriza por la interacción entre una extensa cantidad de áreas al interior y exterior del hospital en diversos momentos del tiempo, por lo tanto, puede afirmarse que la atención en salud es un proceso muy complejo.

De forma particular, en el caso de los servicios quirúrgicos, el problema es más relevante ya que al prolongar las intervenciones vitales de los pacientes en procesos como la asignación de citas de valoración para la realización de cirugías o de control postoperatorio, exámenes previos al procedimiento, autorizaciones y avales de aseguradores

entre otros aspectos, se afecta directamente el bienestar de los pacientes y se incurre en riesgos incluso vitales dado que los tratamientos en algunos casos son críticos y no dan espera [11].

Para los servicios quirúrgicos existen dos tipos de pacientes, los primeros corresponden a los que tienen programada una cirugía (con programación) y los segundos corresponden a los pacientes que entran a servicios quirúrgicos por urgencias (sin programación); a su vez estos pacientes se pueden clasificar como aquellos que entran por primera vez (nuevo) o quien van a controles o ingresan por segunda vez (no nuevo) [12].

El primer punto de interacción del paciente después de ingresar al hospital es con la recepción, donde dependiendo si es un paciente por primera vez, deberá realizar el ingreso de sus datos, si es un paciente que ingreso por segunda vez, sólo se debe corroborar la información, en este momento se genera una espera, ya que los tiempos de operación difieren dependiendo si se debe registrar o corroborar la información. Ingresado el usuario y verificada la información, se da inicio a la fase pre-quirúrgica, que corresponde a la etapa donde se realizan actividades de preparación, para la ejecución del procedimiento, en este momento intervienen varios actores; además del paciente, participan personal médico y administrativo, que entre las funciones que realizan se encuentra ofrecer información, de acuerdo a sus responsabilidades, se aclara información de tipo clínica y procedimental, se revisa la historia clínica, todo lo anterior tiene la finalidad de garantizar el éxito del procedimiento de servicios quirúrgicos [13].

Durante y posterior a la ejecución del servicio quirúrgico, existen una secuencia de actividades que, llevadas de correctamente, minimizan el riesgo de complicaciones posteriores. De acuerdo a estudios realizados por el Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, los errores o fallas en la prestación de los servicios hospitalarios, debido a la ineficiencia en los procesos, afecta a uno de cada diez enfermos en todo el mundo [11], la Alianza Mundial para la Seguridad del Paciente y el Centro Colaborador, han planteado soluciones eficaces para reducir esos errores, como son la ejecución del procedimiento correcto, de acuerdo al diagnóstico correcto, con los recursos requeridos; si se subsana este inconveniente se lograría reducir el riesgo y efectos adversos a través de prácticas seguras (barreras y defensas). Podría resumirse en la ecuación (1) para lograr la reducción de errores, 3P, procesos ajustados, procedimientos con delimitación de alcance y resultados, y planificación de recursos (humanos, tecnológicos, financieros, físicos, etc.).

Proceso ajustado + Procedimiento correcto + Planificación de Recursos = Reducción en errores o reprocesos (1)

El presente estudio propone una metodología BPMH, *Business Process Management for Hospitals*, ajustada a las particularidades del sector hospitalario y los servicios quirúrgicos, comparándolo o asemejando a la estructura de una ADN, y cómo a través de cada uno de los eslabones propuestos en el ciclo de vida, constituido por eslabones, en el sector salud se lograrían mejoras en sus procesos, aumento en la calidad de los servicios ofertados, favorabilidad en la percepción por parte de los usuarios, que podría en el largo plazo redundar en eficiencias de recursos.

2. MÉTODO

El presente estudio se desarrolló bajo un protocolo de revisión sistemática [14] consistente en la definición de preguntas de investigación, planteamiento de la estrategia de búsqueda que incluye la definición de fuentes de información, parámetros de inclusión y exclusión, selección de trabajos y escogencia de un gestor bibliográfico. Por medio de la metodología empleada, se pretendió generar una propuesta de la aplicación del ciclo de vida BPM a los servicios quirúrgicos mediante la síntesis, comparación y análisis de los artículos existentes [15].

2.1 Definición de la pregunta de investigación

Se plantearon las siguientes tres preguntas de investigación (*research questions RQ*), con el objetivo de resolver el propósito de interés de los investigadores, teniendo en cuenta artículos de investigación previos:

- RQ1: ¿Qué usos se evidencian en la metodología BPM?
- RQ2: ¿Qué investigaciones se han realizado sobre el uso del BPM en el sector hospitalario?
- RQ3: ¿Cuáles son los principales beneficios de implementar BPM en los servicios quirúrgicos?

A lo largo del capítulo, se mostrará desde una revisión bibliográfica hasta una aplicación de la metodología BPM, que la implementación de ésta, en el sector salud, específicamente en los servicios quirúrgicos, representa una solución para resolver los inconvenientes o fallas que puedan presentarse por la complejidad de la prestación de estos servicios, al involucrar diferentes actores en el proceso.

2.2 Definición de fuentes de información

Se acudió a la utilización de bases de datos académicas Scopus ® y Web of Science ® y se procedió a realizar la ecuación de búsqueda común para expresar de una forma exacta los requerimientos de información del objeto de

estudio. Aunque existen muchas bases de datos a disponibilidad, es importante precisar que fue necesario revisar la operatividad, funcionalidad y campo de acción de las bases de datos (Scopus®), para lograr afinidad de criterios con la investigación y en especial las que permitiera el uso de un lenguaje de intermediación entre la información que se quería obtener versus la información ofertada por las bases de datos que permitiera incluir términos descriptores tales como palabras claves, tesauros o lenguaje técnico [16]. Por esta razón, no se consideraron bases de datos de literatura gris o sitios web.

2.3 Definición de parámetros de inclusión y exclusión

Para la selección de los artículos de investigación se tuvieron en consideración aspectos relacionados con identificar términos, abreviaturas, siglas, y sinónimos, se incluyeron palabras claves, y la búsqueda se basó en la coincidencia de palabras en el título del artículo, y la amplitud del resumen científico. Se excluyeron artículos duplicados, artículos de menos de cuatro páginas, que en el título no se refiriera al tema principal de investigación, y se excluyeron artículos relacionados con las disciplinas de la medicina, se acotaron únicamente al concepto o usos en hospitales. En la Tabla 1 se detallan los parámetros de inclusión y exclusión, para acotar la búsqueda de información.

Tabla 1. Parámetros de inclusión y de exclusión

Parámetros de inclusión	Parámetros de exclusión
Año (2016- 2020)	Publicaciones duplicadas
Artículos completos en revistas científicas	Artículos cortos (<4 páginas)
Inglés y español	No referidos en el tema principal (BPM)
Publicaciones finales	No hacen alusión a la modelamiento o software
Palabras claves: <i>healthcare, hospital, surgical</i> , BPM, BPMN	Publicaciones alusivas a medicina

2.4 Construcción sistema de ecuaciones de búsqueda

Para la construcción de la ecuación de búsqueda, se utilizaron palabras clave teniendo en cuenta tesauros propios de la disciplina, el objeto de estudio y el marco de la investigación. Se incluyeron nombres propios, metodologías, de igual forma se hizo el uso de palabras claves sencillas y compuestas. Se buscaron palabras en español y su traducción en inglés. Se revisaron siglas y definiciones completas de los conceptos. En la Tabla 2 se presenta la ecuación de búsqueda obtenida para tres etapas o filtros.

Tabla 2. Tamizaje de información

Filtro	Artículos	Ecuación
1	377	All ((bpm or business and process and management or process and management) and (health or healthcare) and (hospital or clinical) and (surgical or surgery) and (bpmn or business process modeling and notation or process modelling))
2	110	All ((bpm or business and process and management or process and management) and (health or healthcare) and (hospital or clinical) and (surgical or surgery) and (bpmn or business process modeling and notation or process modelling)) and (limit-to (pubyear , 2020) or limit-to (pubyear , 2019) or limit-to (pubyear , 2018) or limit-to (pubyear , 2017) or limit-to (pubyear , 2016)) and (limit-to (doctype , ar)) and (limit-to (language , english) or limit-to (language , spanish)) and (limit-to (pubstage , final))
3	22	All ((bpm or business and process and management or process and management) and (health or healthcare) and (hospital or clinical) and (surgical or surgery) and (bpmn or business process modeling and notation or process modelling)) and (limit-to (pubyear , 2020) or limit-to (pubyear , 2019) or limit-to (pubyear , 2018) or limit-to (pubyear , 2017) or limit-to (pubyear , 2016)) and (limit-to (doctype , ar)) and (limit-to (language , english) or limit-to (language , spanish)) and (limit-to (pubstage , final)) and (limit-to (subjarea , medi) or limit-to (subjarea , comp) or limit-to (subjarea , soci) or limit-to (subjarea , bioc) or limit-to (subjarea , econ) or limit-to (subjarea , deci) or limit-to (subjarea , math) or limit-to (subjarea , psyc) or limit-to (subjarea , envi) or limit-to (subjarea , phys) or limit-to (subjarea , mate) or limit-to (subjarea , ceng) or limit-to (subjarea , chem) or limit-to (subjarea , ener) or limit-to (subjarea , phar) or limit-to (subjarea , agri) or limit-to (subjarea , dent) or limit-to (subjarea , neur) or limit-to (subjarea , nurs)) and (exclude (subjarea , medi)) and (exclude (subjarea , ceng) or exclude (subjarea , chem) or exclude (subjarea , comp) or exclude (subjarea , ener))

Los datos mostrados en la Figura 1 corresponden a las estadísticas arrojadas por la base de datos Scopus®, donde se muestra el comportamiento que ha tenido investigación de la metodología BPM en el sector salud, se puede observar que existe interés en el objeto de estudio; sin embargo, para el año 2020, se puede observar una tendencia decreciente, y una motivación para generar propuestas que impacten positivamente este sector.

Una vez consultadas las bases de datos y aplicado los parámetros de inclusión y exclusión se obtuvieron 377 resultados. De acuerdo con los criterios de exclusión, se tamizaron a 110 artículos, y de acuerdo con la información consignada en los resúmenes de los artículos, se seleccionaron 22, de los cuales de obtuvo alguna información para la construcción de la propuesta desde la revisión bibliográfica. Con los artículos seleccionados y los resultados obtenidos de las revisiones se desarrolló un resumen de las temáticas representativas, su aporte al sector hospitalario, para finalmente realizar una propuesta con los elementos requeridos para implementar las seis etapas de un BPM, para los servicios quirúrgicos, haciendo una analogía con el comportamiento del ADN, como la esencia para lograr que éstos se articulen y logren mejorar la percepción de los usuarios, y aumentar sus indicadores de desempeño.

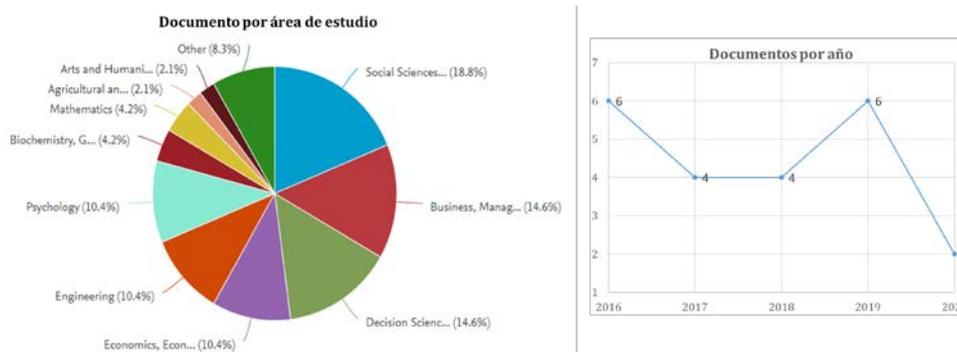


Figura 1. Estadísticas revisión bibliográfica

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Marcos para la gestión de procesos como una taxonomía para los casos de gestión de procesos de negocio (BPM) desde las generalidades de la revisión bibliográfica

El marco para la gestión de procesos de negocio compone conocimientos que ha madurado en las últimas décadas, rediseñando procesos individuales e integrando capacidades corporativas, consolidándose como una disciplina de la gestión caracterizada por dos caminos de desarrollo. BPM integra el control estadístico de procesos y su mejora junto a la tecnología de la información (TI) como importante impulsor de innovación. La metodología BPM, surge como una consolidación de disciplinas aprovechadas para el aumento del rendimiento; con todo esto y más el siguiente artículo permite conocer, cuál es la estructura de la gestión de procesos de negocio, los seis elementos centrales de esta metodología, los componentes de su ciclo de vida y en gran medida direcciona en la implementación del Business Process Management BPM, acompañado de lecciones aprendidas, derivadas de experiencias organizacionales [17].

El modelo de ciclo de vida de BPM describe las fases para la gestión de los procesos y muestra la manera de organizar un proyecto para llegar a un proceso mejorado mediante seis pasos principales: identificación del proceso, revisión, análisis y rediseño de procesos, implementación de procesos mejorados, monitoreo y control [17].

3.2 Modelado de procesos de negocio, un desafío para las organizaciones

El modelado de procesos de negocio representa un desafío organizacional, más aún en el sector salud, por lo que muchas iniciativas apuntan a lograr mejoras en los negocios mediante la utilización de metodologías y herramientas de Modelo y Notación de Procesos de Negocio (BPMN). Sin embargo, todavía hay algunas deficiencias que deben abordarse cuando se trata de lograr una adecuada alineación entre los objetivos organizacionales y los procesos del negocio [16]. Estas dificultades, se potencializan al tener en cuenta que los procesos en las organizaciones son multifuncionales, transversales y en algunos casos interinstitucionales, ya que requiere de otras empresas para lograr cabalmente sus objetivos, por eso es requerido modelar sus procesos internos y la interacción con los stakeholders o partes interesadas [17]. Se pretende mostrar cómo el uso del modelamiento de los procesos permite mejorar el desempeño de los servicios quirúrgicos de un hospital de alta complejidad, determinando el ciclo de vida del BPM, en el cual se identifica el ADN, como la composición y secuencia de técnicas y herramientas para modelar la gestión de procesos, que por medio de indicadores de desempeño (KPI), permita evaluar el desempeño y alinear los procesos (de negocio) con los objetivos corporativos, esta propuesta denominada BPMH, se centra en el impacto de un modelo BPM, H, en el sector de salud Hospitals - Health, teniendo como referencia los servicios quirúrgicos[18].

Para el diseño e implementación de los nuevos servicios de salud, en específico de los servicios quirúrgicos, utilizar una metodología de análisis basado en procesos para el rediseño, a través del BPMN, que busca no solo rediseñar de unos procesos de atención específicos de un hospital, sino que en general se busca sea general y aplicable a cualquier servicio hospitalario, localizando procesos críticos, cuellos de botella, mediante el uso de las técnicas propuestas en la gestión de procesos de negocios (Business Process Management) para aplicar posteriormente reingeniería y mejorarlos [19].

El marco para la gestión de procesos de negocio compone conocimientos que han ido madurando en las últimas décadas, rediseñando los procesos individuales e integrando las capacidades corporativas, consolidándose como una disciplina de la gestión caracterizada por dos caminos de desarrollo. BPM integra el control estadístico de procesos y su mejora junto a la tecnología de la información(TI) como importante impulsor de innovación [20]. La Gestión de Procesos de Negocios surge como una consolidación de disciplinas aprovechadas para el aumento del rendimiento; con todo esto y más el siguiente artículo permite conocer, cuál es la estructura de la gestión de procesos de negocio, los seis elementos centrales de esta metodología, los componentes de su ciclo de vida y en gran medida direcciona en la implementación del Business Process Management acompañado de lecciones aprendidas, derivadas de experiencias organizacionales [21].

3.3 Propuesta de modelo para la implementación de un modelo BPM adaptado al Sector Hospitalario BPMH

La propuesta mostrada en la Figura 2 corresponde al modelo propuesto de adaptación del ciclo de vida para la implementación de un modelo BPM a los servicios hospitalarios que hemos denominado BPMH (Business Process Management for Hospitals), bajo una estructura de interrelación a través de un ADN. A continuación, se detallan las etapas y las consideraciones que se deben tener en cada una de ellas [17].

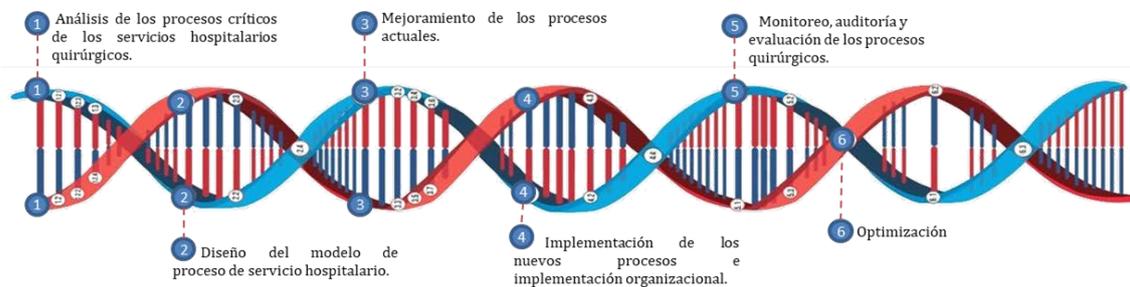


Figura 2. Ciclo de vida del BPMH. Etapas bajo esquema de ADN

1. *Análisis de los procesos críticos de los servicios hospitalarios quirúrgicos.* En esta primera etapa del modelo se inspeccionan los procesos actuales que tiene la entidad de salud para descubrir sus debilidades y sus potenciales mejoras, su definición de procesos o actividades de valor, así como su contribución para alcanzar las metas organizacionales. En este momento, se debe probar cómo interactúan los procesos con los objetivos que se buscan en los servicios quirúrgicos como son: disminución de tiempos, eliminación de reprocesos, calidad de servicios, aprovechamiento de recursos. Una vez revisados los procesos al interior de la entidad de salud, se pueden establecer algunas variables que intervienen de manera transversal a lo largo del proceso:
 - *Paciente:* Persona que solicita o requiere el servicio quirúrgico
 - *Entrada:* cita u autorización para el procedimiento
 - *Salida:* pacientes con procedimiento exitoso, paciente con reingreso a cirugía, paciente con recuperación total
 - *Capacidad de atención del hospital:* la capacidad de recepción de un hospital no sólo está vinculada al número de camas disponibles, sino también a su capacidad para prestar atención médica.
 - *Ocupación:* porcentaje de ocupación hospitalaria es una forma de medir la eficiencia en la utilización de los recursos hospitalarios, dado que informa sobre la capacidad utilizada o subutilizada en los hospitales.
 - *Tiempo de ciclo o estancia:* número de días que, en promedio, permanecen los pacientes internados en el hospital
 - *Rotación:* aprovechamiento de la cama con respecto la agilidad de los servicios prestados en los hospitales
2. *Diseño del modelo de proceso de servicio hospitalario (modelo actual).* El objetivo de esta etapa es mostrar el estado actual de los servicios hospitalarios quirúrgicos con la finalidad de identificar las interfaz entre los procesos, y tener una visión holística de su dinámica y su complejidad [2, 22]. Este modelo puede representarse de distintas maneras, a través de una representación tabular, una descripción textual, un esquema gráfico sin seguir un lenguaje específico, y, por último, el modelo gráfico sobre la base de una notación específica, que es la manera como se encuentran los procesos actuales de los servicios hospitalarios, los cuales se pueden modelados a través de la herramienta bizagi. Esta etapa es de gran importancia, al mostrar un primer panorama de la interacción de las variables que participan en los procesos hospitalarios.
3. *Mejoramiento de los procesos actuales.* Con base en el modelo actual de los procesos, se pueden evidenciar algunos errores procedimentales, de forma y de fondo, entre los que se pueden encontrar algunas imprecisiones en la diagramación de la interacción de las actividades paralelas por secuenciales, errores al no establecer los responsables de las actividades dentro del proceso, falta de categorización de las actividades, entre otras. Entre las mejoras sugeridas al proceso de servicios hospitalarios quirúrgicos se encuentra revisar la secuencia de los procesos, eliminar procesos que no generen valor, unificar procesos para evitar la interfaz entre las actividades (fuente de demora), paralelizar procesos, agilización de los procesos incorporando tecnologías computacionales y actualizar la información documentada con base en las recomendaciones realizadas.
4. *Implementación de los nuevos procesos e implementación organizacional.* En la etapa de implementación, aunque pareciera ser la más fácil de establecer, podría ser la más complicada de ejecutar si no se realiza por medio de una adecuada planeación, definiciones claras de alcances y responsabilidad, por lo que se propone para los servicios hospitalarios incluir los siguientes pasos:
 - *Prueba Piloto:* aplicar el modelo BPMH propuesto en el proceso quirúrgico.
 - *Validaciones:* realizar pruebas que permiten la verificación del correcto funcionamiento del sistema BPM en los procesos quirúrgicos.

- *Recolección de información:* procedimiento en el que se recopila toda la información obtenida a lo largo de todo el proceso quirúrgico, y a través de los indicadores, se evaluar su impacto en el proceso.
5. *Monitoreo, auditoría y evaluación de los procesos quirúrgicos.* Para esta etapa, una vez se haya implementado el ciclo de vida del BPMH, los líderes responsables de los procesos de mejoras, deberán establecer los tiempos requeridos para realizar las revisiones, el método para realizar la auditoría y la escala de medición. En esta etapa se deberán definir indicadores, recolectar información y evaluar los resultados.
- *Indicadores:* directrices y características que verifican el rendimiento a lo largo del proceso quirúrgico, evidenciando el cumplimiento de los objetivos y su conformidad.
 - *Estadísticas- analítica de dato - data labs:* organización y refinamiento de la información recopilada para su posterior empleo.
 - *Propuesta de mejora:* conglomerado de aportes que pretenden perfeccionar el sistema de procesos quirúrgicos.
6. *Optimización.* En la etapa de la optimización los servicios quirúrgicos deberán evaluar el comportamiento de los indicadores de calidad y eficiencia establecidos, a fin de reducir la brecha entre lo esperado por el cliente o paciente, y el servicio quirúrgico prestado. Esta metodología BPMH, en los servicios quirúrgicos, es una forma de administrar y mejorar el desempeño de los servicios a través del modelado, ejecución y valoración, ¡mejorando los resultados a través de mejores prácticas!, donde todas las partes interesadas se articulan de manera secuencial y sistemática, propiciando un entorno colaborativo monitorizado que permite conocer qué, por qué y cómo interactúan los procesos y actores [23].

Para la gestión de negocio, como una herramienta de optimización, la metodología BPMN apoya la gestión de procesos los procesos, tanto para el personal médico (usuarios técnicos), como para los actores administrativos y organizacionales (usuarios de negocios), proporcionando una notación o convención intuitiva para ambos usuarios, capaz de representar simplificaciones y mejoras en de procesos complejas, como son los servicios hospitalarios del sistema de salud. En esta etapa, para los servicios quirúrgicos, se definieron las cuatro categorías básicas (Tabla 3). Estas cuatro categorías permiten realizar un diagrama simple de procesos de negocio.

Tabla 3. Detalle categorías implementación modelo

Categoría	Descripción
Objetos de Flujo	Eventos, actividades, procesos subprocesos
Objetos de Conexión	Flujos de secuencia y conexión
Carriles o piscinas	Responsables o roles
Artefactos	Objetos de Datos, grupo, anotación.

El modelo BPMH, al basarse en la gestión de los procesos, sigue un modelo cíclico, al tener que auto-renovarse y auto-mejorarse, en tres fases generales, como se muestra en la Figura 3; diseño y modelado del proceso, variables y el despliegue de esta variante en un entorno de tiempo de ejecución. El ciclo de vida del proceso puede ser descrito como un ciclo (retroalimentación) de estas fases durante el cual un proceso es continuamente optimizado y adaptado.



Figura 3. Etapas para optimizar Ciclo de vida del BPMH

El diseño de procesos de negocios proporciona un mecanismo efectivo para alinear los procesos de negocios con los objetivos organizacionales. Del mismo modo, las mejoras de los procesos pueden impactar los objetivos organizacionales para facilitar el análisis y asegurar que no existan conflictos con los objetivos existentes. Con la ejecución de estas tres etapas, aunque son preliminares y generales, por su naturaleza sistemática hace posible estandarizar los procesos y sistematizarlos mediante una herramienta de software, para el caso de estudio, bizagi.

3.4 Análisis del impacto esperado del desempeño de la propuesta BPMH en los servicios hospitalarios quirúrgicos

A pesar de parecer que el sector de la salud se encuentra rezagado en la aplicación de la metodología BPM, debido a no sólo al cumplimiento de los pasos planteados en la implementación, sino también a un componente que hace referencia al compromiso y comprensión que los médicos puedan tener frente a la complejidad de la atención y servicio que requieren los pacientes, y como los gerentes deben entender la complejidad y diversidad de sus usuarios

o clientes. Es por esto, que se llegó a la siguiente pregunta, ¿por qué centrarse en la calidad en la prestación de los servicios de salud? Las herramientas de control de calidad tradicional han tenido un impacto importante en el desarrollo e implementación de la metodología BPM, permitiendo mejorar la eficiencia del sector hospitalario [24].

Con los continuos desafíos enfrentados en los sistemas de salud, el impulso se centra en una maximización del aprovechamiento de recursos y en una minimización de implementos y residuos, sin una afectación en la calidad de la atención al paciente. En la Tabla 4 se presentan las variables que determinan el desempeño de los servicios, su definición, el estado en que se encuentran y el impacto que tendrían en los servicios quirúrgicos si son gestionados bajo una metodología de mejoramiento.

Tabla 4. Análisis del Desempeño de las variables

Variable	Definición	Estado	Impacto	Dirección de mejoramiento
Accesibilidad	Facilidad para obtener los servicios hospitalarios	⊖	Disminución de los costos	▼
Percepción del paciente	Resultado del cumplimiento de las expectativas del paciente vs. la atención recibida	⊖	Variaciones en niveles de percepción de la calidad	▼
Equidad	Asignación igualitaria de recursos según necesidad	0	Diversidad en usuarios	▲
Seguridad	Elementos, procesos y metodologías que garanticen los procedimientos realizados	0	Minimizan el riesgo de sufrir eventos adversos	▼
Efectividad	Grado en el que se produce el resultado esperado	0	Capacidad de respuesta	▲
Competencia profesional	Conocimientos, habilidades y actitudes de los diferentes roles, para realizar las funciones y actividades adecuadamente	0	Disminución de riesgo en los procedimientos	▼
Continuidad	Garantía que los usuarios reciben las intervenciones de acuerdo interrupciones innecesarias	⊖	Oportunidad en la ejecución de los procedimientos	▲

Pobre (⊖), Moderado (0), Maximizar (▲), Minimizar (▼)

Más allá de la complejidad del entorno o realidad de los servicios hospitalarios, a menudo surgen desafíos de problemas no necesariamente dentro de la atención médica que impactan en el desempeño de los sistemas de salud. La metodología BPM, puede jugar un papel importante para facilitar la gestión efectiva de la atención médica, particularmente en el futuro, a través de siete pasos prácticos para el camino a seguir (BPMH). Hay evidencias de lograr eficiencia y satisfacción del paciente mediante la aplicación de varios métodos de BPM en la industria de la salud. La práctica de esta filosofía requiere un cambio de paradigma para administrar los servicios de salud holísticamente, a través de toda su cadena de suministro, haciendo reingeniería de procesos, seleccionando la tecnología de la información correcta (TI), y transformando su estructura y cultura, con la participación de los actores en los niveles estratégicos, tácticos y operativos.

3.5 Modelamiento BPMN para los Servicios Hospitalarios: un reto para para el Sector Salud

A pesar de los diferentes lenguajes de programación para modelado de procesos, BPMN, *business process model and notation*, puede considerarse un estándar de factible y útil para modelar la naturaleza de los procesos multidisciplinarios y complejos de los servicios hospitalarios. La complejidad de estos procesos radica, entre muchos otros aspectos, por la inadecuada asignación de roles y tareas [25]. Para estudiar la interacción de los roles, se requiere de acuerdo al BPMN, definir los diferentes tipos, para subordinar la complejidad de los procesos, específicamente en los servicios quirúrgicos, como se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5. Roles y características en los servicios quirúrgicos

Roles	Características	Objetivo
Varios roles participan en el proceso	Personal administrativo, enfermeras, médicos, especialistas y terapeutas	Ofrecer a los pacientes un tratamiento altamente personalizado y profesional
Varios especialistas participan en una misma tarea	Cirujanos, anestesiólogo, instrumentadores, diferentes asistentes, enfermeras y otro personal	Intervenir y tratar al paciente
Una tarea puede ser realizada por diferentes roles	Un médico puede realizar una tarea que generalmente realiza una enfermera	Alternabilidad de responsabilidades. Descongestionar el sistema
Una tarea puede incluir opcionalmente roles adicionales	Un médico puede solicitar un especialista a para consultas	Obtener segundas opiniones sobre los diagnósticos. Eficacia en los procedimientos

BPMN proporciona la notación de carriles para estos roles en una organización. Por lo tanto, un diagrama se puede dividir en compartimentos horizontales que contienen las tareas asignadas a un rol específico, cada rol debe contar con su propio carril o piscina, como se muestra en la Figura 4. Los miembros del rol pueden mirar el diagrama, buscar en su carril o piscina y escanearlo en busca de tareas que tienen que realizar en el proceso. También es bastante fácil identificar el traspaso de trabajo, observando cruces de bordes de carriles y flujos de control. Aunque estas son buenas

características, el inconveniente de este método de visualización es espacio desperdiciado, particularmente si cada rol tiene pocas tareas en el proceso. Por lo tanto, los carriles generalmente causan un desproporcionado aumento del tamaño del diagrama al codificar solo información de rol simple. En el peor de los casos, un diseño de cascada, el tamaño del diagrama crece cuadráticamente con el recuento de tareas. Otra posibilidad para agregar información de roles es el uso de una anotación para cada tarea, a través de un comentario, un artefacto o cualquier tipo de símbolo único. El inconveniente de las anotaciones para cada tarea es su poca legibilidad.

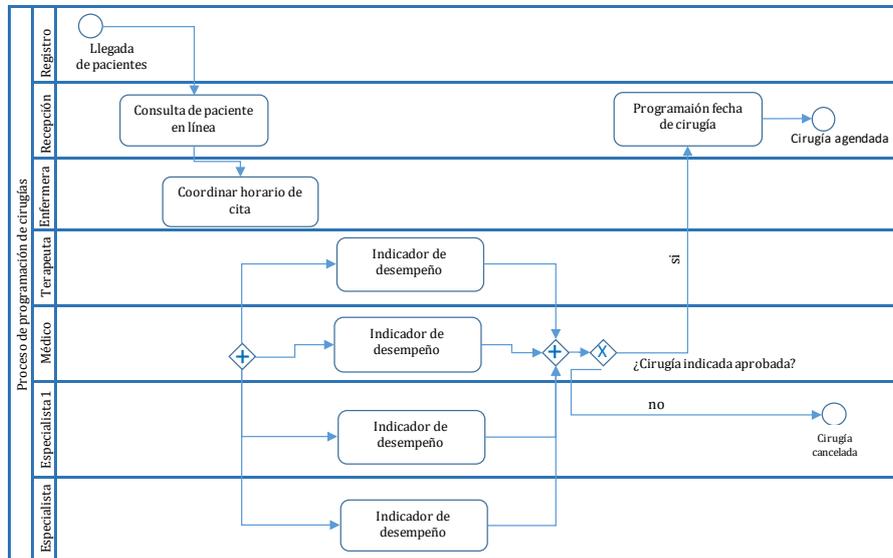


Figura 4. Modelamiento de los servicios quirúrgicos con carriles por rol

Ambos enfoques mencionados anteriormente tienen inconvenientes específicos cuando se trata con muchos roles, espacio desperdiciado o legibilidad obstaculizada, esta representación se puede realizar utilizando tareas coloreadas para capturar información de roles de un proceso de una manera más compacta, no representando carriles por funciones, sino que los roles son representados por colores, como se muestra en la Figura 6, una misma tarea puede ser realizada por varios roles, y deberá tener diferentes colores en su representación.

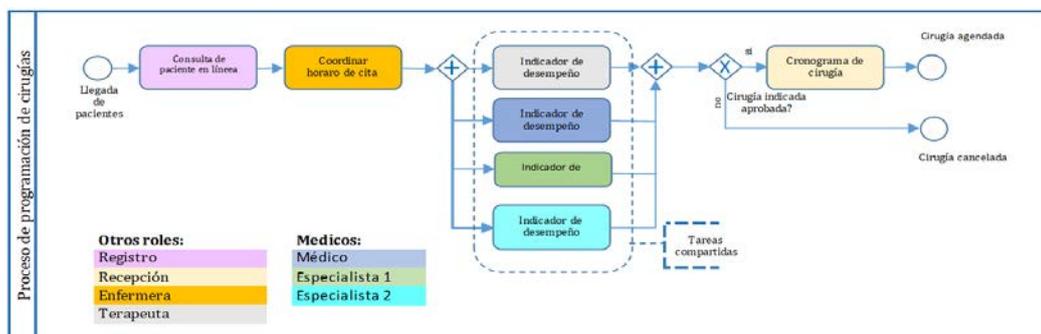


Figura 5. Proceso de preparación de una cirugía con información de roles codificada en colores

Hacer el diagrama de la manera mostrada en la figura anterior permite tener un único carril, hacerlo de la manera tradicional hubiera representado incluir siete carriles, ocupando mucho espacio, ya que no todos los roles necesariamente realizan muchas actividades o tareas. BPMN no admite el modelado explícito de tareas compartidas [26]. Sin embargo, como soluciones alternativas, existe una variación en el modelo que resume de una forma más sencilla y comprimida, como se muestra en la Figura 7, donde una misma actividad puede ser realizada por diferentes roles.

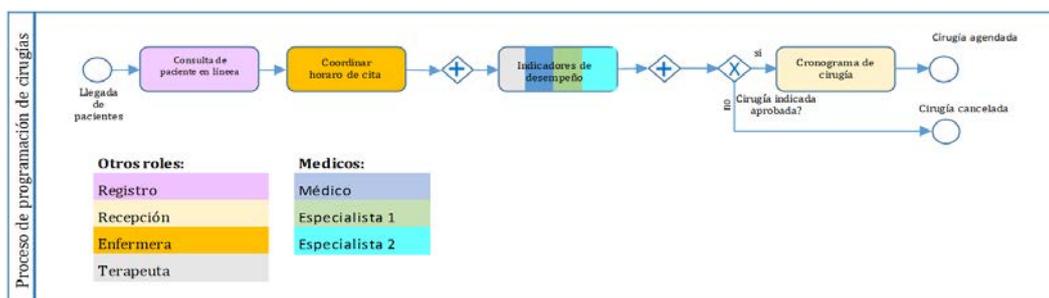


Figura 6. Proceso de preparación de una cirugía con información multicolor por tarea

Por medio de la utilización de un diagrama de colores por tarea, de los servicios quirúrgicos, se pretende que sea más fácil para cada uno de los roles, identificar las tareas a su cargo, la forma como interactúan todos los involucrados y se simplificaría el diagrama de los procesos, haciendo que la consulta y apropiación de éstos, sea más sencilla e intuitiva.

3.6 Desempeño y beneficios de la aplicación del BPMH

Al hablar de procesos, y su eficiencia, para los servicios hospitalarios contar con una adecuada articulación de éstos, es de vital importancia, al tener que asegurar la conservación de la vida de los pacientes y de todos los actores que participan, como personal de salud, personal administrativo, y terceros; para lo cual, se debe asegurar que durante la secuencia de actividades se logre disminuir o minimizar riesgos que impidan una adecuada calidad hospitalaria [24].

Constantemente, las metodologías y procedimientos utilizados en el sector hospitalario se están actualizando de manera continua y sistemática, en ese orden, se consideran y reevalúan las logísticas de materiales, equipos, mantenimientos, insumos y todos los recursos que se consideran críticos y claves en la prestación de los servicios hospitalarios incluyendo los quirúrgicos, es así como la gestión por procesos, BPM, aporta beneficios que facilitan simplificar, la complejidad de dichos servicios al tener que, armonizar y alinear los esfuerzos de las directivas de los hospitales, manejar la dinámica o visión de negocios, cumplir con los lineamientos legales, y lograr tener una percepción de calidad en los servicios por parte de los usuarios, siendo este el mayor de los desafíos en el sector hospitalario [27].

Para los servicios quirúrgicos, es también un reto, mostrar y concientizar a los profesionales de la salud, a que su conocimiento y aplicación, no sólo ayudan a salvar vidas, sino que sirven también para mejorar la calidad de los procesos desde su especialidad, experticia, experiencia y buenas prácticas. En este punto, el gobierno corporativo manejado en los hospitales es el respaldo para lograr credibilidad, estabilidad, mantenimiento e incremento en la participación de todos los actores, al regular la relación entre las directivas y el resto de partes interesadas. Por todo lo anterior, la metodología BPM, entre sus beneficios, ofrece al sector hospitalario:

- Aumentar el involucramiento y participación del personal de salud (tecnicismo)
- Generar de escenarios de planificación estratégica ágil
- Alinear la planificación estratégica con los objetivos de los procesos
- Mejorar la eficiencia de los sistemas de control (riesgos)
- Utilización de indicadores como herramientas de monitoreo
- Integración de los procesos de planificación, procesos de gestión y de control
- Mejorar la interacción de los procesos de forma concurrente
- Intercambio de conocimiento (gestión del conocimiento)
- Adaptación rápida a ambientes externos e implementación de nuevas tecnologías

Para los servicios quirúrgicos, implementar BPMH, facilitará y permitirá la gestión de procesos, agilizará la contratación de proveedores, facilitará el adecuado registro de pacientes, flujo de insumos, gestión de compras, gestión con proveedores, y gestión financiera, entre otras actividades:

- Registros completos con información de los pacientes (historias clínicas, consultas o citas, exámenes, pagos, servicios posquirúrgicos)
- Registro de proveedores
- Asignación de citas (calendario)
- Organización de gastos, insumos, facturación
- Gestión documental
- Estandarización de los procesos

Cuando se utiliza el sistema de BPMH, se logran procesos articulados, ágiles, con mayor eficiencia y eficacia, permitiendo tener mayor supervisión, monitoreo y control de calidad de los procesos hospitales, y por consiguiente de los servicios hospitalarios quirúrgicos.

4. CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica como antecedente a la propuesta investigativa, permitió conocer la taxonomía de los procesos de negocio, sus beneficios, herramientas y dificultades al implementar metodologías, BPM, en las organizaciones, y un reto adicional para el sector salud, que además de presentar desde su disciplina altos estándares deben participar de forma activa en los procesos de gestión administrativa.

La industria de la salud en particular se beneficiará de este enfoque ya que el uso de las metodologías BPM, reconoce que los procesos cuidadosamente definidos pueden ser herramientas efectivas para guiar y coordinar las acciones de

los profesionales de la salud; de igual forma, la implementación de modelos BPMH, representaran un desafío global para el campo de los servicios hospitalarios ya que es una herramienta que apunta a la disminución de recursos y aumento en los requisitos de los paciente, quienes cada vez más exigen, servicios de salud de alta calidad.

Es necesario mencionar que, para el caso particular de los servicios de salud, este es muy limitado en términos de recursos físicos, financieros y humanos, lo que implica la aplicación estricta y específica de métodos de mejora de procesos que respalden la prestación efectiva de servicios al paciente y que a su vez esté alineado con las estrategias organizacionales y los lineamientos del Sector Hospitalario (gobernanza). Para países en desarrollo como Colombia, la Gestión de Procesos de Negocio (BPM), es importante considerando el impacto que la mejora del proceso ofrece tanto para las instituciones hospitalarias, como para mejorar la percepción del servicio de salud del país.

Las organizaciones de salud se ven cada vez más presionadas para mejorar la calidad del servicio de atención teniendo en cuenta la creciente complejidad en el tratamiento del paciente y la reducción continua de los recursos disponibles. La adopción de prácticas de Business Process Management (BPM) se está convirtiendo en un facilitador clave para la mejora de los procesos de atención médica. En consecuencia, se requieren métodos y herramientas para abordar los aspectos de comportamiento y rendimiento de las primeras fases del ciclo de vida del proceso a fin de mejorar la calidad de la atención médica, reducir los costos, reprocesos y lograr aumentar la eficacia de los enfoques de BPM.

La metodología BPMH es considerada como un enfoque adecuado para la consolidación y la gestión eficaz de todas las funciones de atención al paciente para lograr eficiencias operativas, por su parte, a eficacia de la automatización para los procesos de atención al paciente, en servicios quirúrgicos ha sido cuestionada por el sector de la salud; sin embargo, el BPMH, significa una alternativa para racionalizar todos los procesos de atención hospitalaria.

Es fundamental documentar y analizar los procesos comerciales centrales dentro de las instituciones de salud y establecer un conjunto de métricas, controles e indicadores mediante las cuales se pueda administrar y gestionar. Al mejorar las operaciones comerciales del hospital, habrá un impacto directo sobre el sistema nacional de salud, una oportunidad para satisfacer la demanda internacional y, lo que es más importante, mejores resultados en términos de calidad que sean sostenibles a lo largo del tiempo.

Los servicios hospitalarios, se enfrentan al desafío de brindar servicios personalizados a sus pacientes de manera rentable y a su vez eficiente, lo que implica no sólo contar con procesos coordinados y articulados, sino que requiere de un soporte informático ágil y avanzado para los procesos de atención médica que cubren tanto los procedimientos organizacionales, los procedimientos médicos y los procesos de tratamiento dinámico intensivos en conocimiento. La oportunidad en los servicios quirúrgicos se ve obstaculizada por la falta de flexibilidad en los sistemas de información hospitalaria. Para superar este inconveniente, ha surgido una nueva generación de sistemas de información, denominados sistemas de información conscientes del proceso, que permiten la adaptación del proceso, la flexibilidad del proceso y la evolución del proceso.

Se propuso en este capítulo una metodología, Business Process Management for Hospitals BPMH, ajustado a las particularidades del sector hospitalario y los servicios quirúrgicos, comparándolo a la estructura de una ADN, y cómo a través de cada uno de los eslabones propuestos en el ciclo de vida (constituido por eslabones) en el sector salud se lograrían mejoras en sus procesos, aumento en la calidad de los servicios ofertados, favorabilidad en la percepción por parte de los usuarios, lo que ocasiona en el largo plazo eficiencias de recursos.

REFERENCIAS

- [1] Segatto M., de Pádua, S. y Martinelli, D. (2013). Business process management: A systemic approach? *Bus. Process Manag. J.* 4, 698-714.
- [2] Kasemsap, K. (2018). Mastering business process management and business intelligence in global business. *IGI Global* 1, 76-96.
- [3] Klun, M. y Trkman, P. (2018). Business process management – at the crossroads, *Bus. Process Manag. J.* 24, 786–813.
- [4] Dinsmore, P. y Cabanis, J. (2014). *The AMA Handbook of Project Management*. AMACOM.
- [5] Maldonado, M. et al. (2020). Similarities and differences between business process management and lean management. *Business Process Management Journal*. Vol. ahead-of-print, No. ahead-of-print.
- [6] Lau H. et al. (2016). BPM for supporting customer relationship and profit decision. *Business Process Management Journal* 22(1), 231-255.
- [7] Bucher, T., Raber, D. y Winter, R. (2015). A taxonomy of business process management approaches. *Strategic Alignment, Governance, People and Culture* 2, 203–226.
- [8] Calabro, A., Lonetti F. y Marchetti, E. (2015). Monitoring of Business Process Execution Based on Performance Indicators. *En Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications*. Madeira, Portugal.
- [9] Bisogno, S. et al. (2015). Combining modelling and simulation approaches: How to measure performance of business processes. *Business Process Management Journal* 22(1), 56-74.
- [10] Helfert, M. (2009). Challenges of Business Processes Management in Healthcare: Experience in the Irish healthcare sector. *Business Process Management Journal* 15, 937-952.

- [11] Ministerio de Salud y Protección Social. (1996). Circular No 001. Recuperado: [http://www.saludcapital.gov.co/sitios/SectorBelleza/Galera de descargas/Normatividad/Circulares/Circular 001 de 1996 - Procedimientos en Salud Estética.pdf](http://www.saludcapital.gov.co/sitios/SectorBelleza/Galera%20de%20descargas/Normatividad/Circulares/Circular%20001%20de%201996%20-%20Procedimientos%20en%20Salud%20Est%C3%A9tica.pdf).
- [12] Gabryelczyk, R. (2019). Exploring BPM Adoption Factors: Insights into Literature and Experts Knowledge. En 15th Conference on Advanced Information Technologies for Management. Leipzig, Germany.
- [13] Pidun, T. y Felden, C. (2012). On improving the visibility of hard-measurable process performance. *International Journal of Intelligent Information Technologies* 8(2), 59-74.
- [14] Espinosa, M. et al. (2020). Methodological proposal for the compilation and analysis of information from scientific articles. An approach from bibliometrics and the systematic review of literature 28, 110-122.
- [15] Kitchenham, S. y Charters, B. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering Techreport. School of Computer Science and Mathematics.
- [16] Cardona, J., Higueta, L. y Ríos, L. (2016). Revisión sistemática de la literatura científica. Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia.
- [17] Brocke, J. y Mendling, J. (2018). Frameworks for Business Process Management: A Taxonomy for Business Process Management Cases. En vom Brocke, J. y Mendling, J. (Eds.), *Business Process Management Cases - Digital Innovation and Business Transformation in Practice* (1-17). Springer.
- [18] Damij, N., Damij, T. y Jelenc, F. (2015). Healthcare process analysis and improvement at the department of abdominal surgery, university medical centre Ljubljana. *Zdravniški vestnik* 84(1), 26-37.
- [19] Münstermann, B., Eckhardt, A. y Weitzel, T. (2010). The performance impact of business process standardization: An empirical evaluation of the recruitment process. *Business Process Management Journal* 16(1), 29-56.
- [20] Bandara, W. et al. (2016). Improving the clinical-care pathway of an Ayurvedic hospital: A teaching case for developing process improvement capabilities. *Journal of Information Technology Teaching Cases* 6, 111-120.
- [21] Gabryelczyk, R., Jurczuk, A. y Roztocki, N. (2016). Business process management in transition economies: Current research landscape and future opportunities. En 22nd Americas Conference on Information Systems: Surfing the IT Innovation Wave. San Diego, USA.
- [22] Osterweil, L. (2011). Context, retrospection, and prospection in healthcare process definitions. En *BPM 2011 International Workshops*, Clermont-Ferrand, France.
- [23] Alotaibi, Y. (2017). Graphical business process modelling standards, techniques and languages: A literature review. *International Journal of Business Information Systems* 25(1), 18-54.
- [24] Leu, J. y Huang, Y. (2011). An application of business process method to the clinical efficiency of hospital. *Journal of Medical Systems* 35(3), 409-421.
- [25] Rentes, V. et al. (2019). Implementation of a strategic planning process oriented towards promoting business process management (BPM) at a clinical research centre (CRC). *Business Process Management Journal* 25(4), 707-737.
- [26] Ryan, J. et al. (2017). Using key performance indicators to reduce perceived perioperative complexity and improve patient workflow. *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics* 12(4), 13-30.
- [27] Constantin, H., Peter, F. y Peter, L. (2010). Empirical research in business process management – Analysis of an emerging field of research. *Business Process Management Journal* 16(4), 619-661.

Comportamiento de los Sistemas de Información para la optimización de procesos en Instituciones de Educación Superior: Una revisión sistemática

Lauren Yinett Gómez Quintero
Johana A. Manrique
Universidad Popular del Cesar
Colombia

Las Instituciones de Educación Superior - IES se deben a lo social, la consolidación de conocimiento hace que su función traspase fronteras y establezcan objetivos que se enfocan a la consolidación de un mejoramiento hacia la humanidad. En este sentido, ninguna IES puede retrasar la implantación de tecnologías a sus procesos de servicio. La IES no es y no puede ser ajena a esta integración en el mundo digital. Como cualquier organización, tiene unos objetivos de los que debe rendir cuentas a la sociedad. Identificar el comportamiento de los sistemas de información para la optimización de procesos en las IES permite tener referentes para la toma de decisiones y evaluación de modelos de los Sistemas de Planificación de Recursos Empresariales ERP. Por lo anterior, este estudio consideró una revisión sistemática de la literatura (*Systematic Literature Review SLR*) basada en un marco metodológico, en el cual se realizó una búsqueda avanzada en la biblioteca digital en línea Scopus a través de una recopilación manual de resultados para recuperar los estudios relevantes que respondieran a las preguntas de búsqueda especificadas. Dentro de los principales resultados obtenidos se pudo establecer que las IES que implantan ERP no solo establecen módulos para los procesos de apoyo, sino también para procesos académicos y estratégicos. Por su parte los aspectos más destacados para la optimización de los procesos hacen referencia a la reducción de tiempos, disponibilidad de la información y trazabilidad. Finalmente, se identificó que aspectos como la comunicación o transferencia de información con usuarios internos y un diseño de interfaz sencillo y adecuado son necesarios para optimizar la eficiencia en quien lo usa.

1. INTRODUCCIÓN

Las organizaciones han evolucionado a través del tiempo en gran medida por las innovaciones tecnológicas relacionadas con la ingeniería de producción, pero también en sus procesos de administración. Esto se debe a que su concepción sistémica permite su gestión de manera integral y globalizada, por lo cual una organización que desarrolla un producto, método o proceso nuevo, es una organización que aprende a gestionarse de una forma diferente [1]. La gestión en una empresa siempre ha sido un desafío, en gran medida porque supone articular todas las áreas, actividades y personas sobre el compás de un proceso, que surge desde el aprovisionamiento de las entradas y las etapas de transformación hasta los resultados o productos; internamente y de cara al cliente.

Esos desafíos han sido abordados por la Tecnologías de la Información y Comunicación TIC a través del desarrollo de los Sistemas de planificación de recursos empresariales (Enterprise Resources Planning ERP) [2]. Los ERP son sistemas de información que emplean las TIC con la ingeniería de procesos para el rediseño e integración del sistema organizacional, brindando soporte de las operaciones en el marco de la estrategia empresarial. Es decir, estos sistemas permiten a la empresa evolucionar y desarrollar nuevas formas de gestión, para la optimización de recursos y maximización de los beneficios o utilidades [3].

Los ERP basan sus inicios desde la creación de la empresa alemana Systeme, Anwendungen und Produkte für Dateverarbeitung SAP, la cual revolucionó la industria desarrollando una solución informática robusta para la gestión empresarial. Este programa está basado en una arquitectura UNIX cliente/servidor que opera en un ambiente de grandes computadores, o mainframes. Debido a su éxito, la competencia por el mercado aumentó, lo cual condujo a empresas como SAP, Oracle y Microsoft, entre otras, a distribuir software para la gestión empresarial tanto para multinacionales como para las pequeñas y medianas empresas Pymes [4].

Actualmente, la conexión entre sistemas ERP de distintas organizaciones es un elemento fundamental para la gestión de la cadena de suministros (Supply Chain Management SCM) donde se produce intercambio de información y contenidos por todos los agentes implicados en un canal logístico, desde las materias primas hasta los productos terminados [5]. En este sentido, la evolución de los sistemas telemáticos, también conocidos como sistemas de intercambio electrónico de datos (Electronic Data Interchange EDI) ha proporcionado posibilidades para conectar los sistemas de gestión entre empresas. Los sistemas ERP adscritos a esta última modalidad utilizan lo que se conoce como soluciones B2B (Business to Business) y B2C (Business to Consumer). Los sistemas B2B inciden sobre la mejora en que se interrelacionan las empresas mediante la utilización de sistemas de información compartidos. Las soluciones B2C están orientadas a la interacción con los clientes finales mediante el uso de las nuevas TIC [6].

En la actualidad, los sistemas de gestión empresarial conviven y compiten con otros sistemas de información. Entre las diversas soluciones que ofrece el mercado, merece la pena destacar dos: la administración basada en la relación con los clientes (Customer Relationship Management CRM) y el ciclo de vida de un producto (en inglés, Product Lifecycle Management PLM). La integración adecuada de sistemas CRM basados en tecnología Web, sistemas PLM colaborativos y sistemas SCM permiten una completa gestión informática del ciclo de diseño y el ciclo de pedido, cumpliendo así al cien por cien el ideal de la Empresa Digital [7].

Aunque su objetivo principal está orientado a la gestión empresarial, los ERP pueden conducir a múltiples desempeños que otorgan la conformación de una red de información. Se caracterizan principalmente por cubrir una amplia gama de funcionalidades, entre ellas la adaptabilidad en diversos tipos de empresas y la integración de sus datos. Estos sistemas están compuestos básicamente por módulos y una base de datos central. Los módulos contienen las funcionalidades que apoyan las actividades de varios procesos de negocios, como *marketing*, venta, compra, producción, gestión de recursos financieros y físicos. Los datos utilizados por cada uno de los módulos se almacenan en la base de datos central, para ser manipulados por otros módulos, asegurando la integración entre procesos de negocio [8]. Todo esto permite que una organización pueda ver, obtener, producir, administrar, gestionar, conocer, procesar y analizar información que le soporte su estructura de negocios y que le permita tomar decisiones como una ventaja competitiva. También pueden mejorar los procesos, reducir el tiempo, ahorrar costos, diseñar métodos más eficaces y eficientes, para finalmente cambiar la dinámica empresarial.

Por consiguiente, como toda organización, las Instituciones de Educación Superior – IES reflejan más que nunca la necesidad de estar a la vanguardia del conocimiento, pues es desde su misma función de producción de saberes las encargadas de trasladar los conocimientos y los avances a la realidad de los países y crean la oportunidad de enlazar el mundo teórico con el mundo productivo. En este sentido ninguna IES puede retrasar la implantación de tecnologías a sus procesos de servicio. La IES no es y no puede ser ajena a esta integración en el mundo digital. Como cualquier organización, tiene unos objetivos de los que debe rendir cuentas a la sociedad. Además, como también sucede en otros ámbitos, su modelo de funcionamiento se encuentra más ligado que nunca a las TIC. Existe, pues, una correlación evidente entre la tecnología y la eficacia con la que pueda responder la IES en sus procesos [9]. Basado en lo anterior, a través de este estudio se presenta una revisión de la literatura sobre el comportamiento de los sistemas de información (ERP) para la optimización de procesos en las IES con el fin de tomar las mejores prácticas de manera que puedan ser implementadas en este tipo de organización.

2. MÉTODO

Este estudio ha sido conducido como una revisión sistemática de la literatura (Systematic Literature Review SLR) basada en un marco metodológico desarrollado previamente Kitchenham y Charters [10], que proporciona un conjunto de pasos bien definidos de acuerdo con un protocolo de búsqueda. La SLR puede verse como el punto principal que diferencia un procedimiento sistemático de una revisión de literatura tradicional, ya que busca evitar la ambigüedad a lo largo del proceso, proporcionando así un valor científico para los hallazgos obtenidos.

La SLR está dividida en tres fases, a saber: 1) planeación, donde se definen las preguntas de búsqueda (Research Question RQ), la estrategia de búsqueda, los criterios de selección, los métodos de extracción de los datos, generando así un protocolo que guiará todo el proceso de la revisión de los estudios primarios; 2) conducción, se identifican, seleccionan y evalúan los estudios primarios de acuerdo con el protocolo previamente establecido y; 3) reporte, se expone la información extraída de los estudios primarios que atienden las RQ. Las siguientes subsecciones detallan la aplicación de las tres fases descritas anteriormente.

2.1 Planeación de la SLR

El objetivo de la SLR es identificar, seleccionar, analizar y agregar de manera sistemática estudios primarios que aborden el comportamiento de los sistemas de información para la optimización de procesos en las IES. Para cumplir con este objetivo, se propusieron como guía las siguientes preguntas de búsqueda:

- RQ1: ¿De qué manera se caracterizan las IES que implementan sistemas de información?
- RQ2: ¿De qué manera los sistemas de información optimizan los procesos en las IES?
- RQ3: ¿Cuáles son las características (Requisitos No funcionales) de los sistemas de información en las IES?

Se realizó una búsqueda avanzada en la biblioteca digital en línea Scopus a través de una recopilación manual de resultados para recuperar toda la literatura relevante para responder las RQ especificadas anteriormente. Se eligió Scopus por ser una base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas que contiene aproximadamente 18.000 títulos de más de 5000 editores internacionales, y 16.500 revistas revisadas por pares de las áreas de ciencias, tecnología, medicina, ciencias sociales, artes y humanidades.

Para poder realizar la consulta en Scopus, se tomó como base términos clave de las RQ para formar tres grupos con características semejantes (sinónimos), como se presentan en la Tabla 1. Cabe resaltar que la información más relevante, de mayor impacto y actualizada en el ámbito investigativo se encuentra en inglés.

El Grupo 1 son aquellos términos relacionados con sistemas de información y manipulación de datos. El Grupo 2 está relacionado con la optimización de procesos y la inclusión de los ERP. Finalmente, el Grupo 3 discrimina si el estudio primario fue realizado para una IES. Fue importante delimitar la fecha de búsqueda para obtener solo los estudios de los últimos 5 años tal y como se muestra en la Figura 1.

Tabla 1. Términos clave para la cadena de búsqueda

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Information system	Optimized process	Higher education
Data system	ERP	University
Archives	Enterprise resource planning	College
Documentation system		
File system		
Information Resources		

TITLE-ABS-KEY(
 ("information system" OR "data system" OR archives OR "documentation system"
 OR "file system" OR "information resources")
 AND ("optimized process" OR ERP OR "Enterprise resource planning")
 AND ("Higher education" OR university OR college))
 AND PUBYEAR > 2014

Figura 1. Cadena de búsqueda de Scopus

Para reducir progresivamente la cantidad de estudios encontrados en la búsqueda a un número con alta calidad relevantes para atender las RQ planteadas, se establecieron unos criterios de selección, denominados: inclusión (CI) y exclusión (CE).

- CI1: El estudio está escrito en inglés, portugués o español.
- CI2: El estudio es de tipo artículo, libro, capítulo de libro o artículo de conferencia.
- CI3: El título (en inglés, *title*) y resumen (en inglés, *abstract*) del estudio coinciden con los criterios de búsqueda.
- CI4: El estudio describe el comportamiento de los sistemas de información en las IES.
- CE1: No se tiene acceso a todo el documento.
- CE2: El estudio está relacionado con IES, pero no propone o discute ni herramientas, ni técnicas para la optimización de procesos de los sistemas de información.
- CE3: El estudio no es primario ya que expone un estado del arte sobre la optimización de procesos de los sistemas de información en las IES.
- CE4: El estudio se repite en dos o más bases de datos.

Después de completar el proceso anterior, se realiza un proceso de extracción de datos de los estudios primarios recolectados para analizar el comportamiento de los sistemas de información para la optimización de procesos en las IES, de tal forma que se pudiera comenzar la etapa de la síntesis de la revisión. Los datos que se extraen de cada estudio se detallan en la Tabla 2. Todos los hallazgos están presentados y discutidos en la sección de reporte.

Tabla 2. Datos de extracción

Campos RQ1	Apoyo	
	Formación	
	Investigación	
	Extensión Social	
	Evaluación	
	Estrategia	
Campos RQ2	Caracterización	Disponibilidad
		Trazabilidad
		Modularidad
		Reducción de Tiempo
		Control de riesgos
		Protección de error contra el usuario
Campos RQ3	Almacenamiento	Centralizado
		Descentralizado
	Proceso	Manual
		Semiautomatizado
		Automatizado
	Comunicación de datos	Internos
Externos		
Fácil acceso		

2.2 Conducción de la SLR

El protocolo establecido en la fase de planeación fue usado para buscar, seleccionar y evaluar los estudios preliminares. Para esto, se usó la cadena de búsqueda en Scopus obteniendo como resultados 63 estudios. Inicialmente, se aplicaron los CI y CE aplicados al título, resumen y las palabras clave abordadas por cada estudio de los cuales se seleccionaron 20. Estos estudios fueron descargados y usados para extraer los datos definidos en la Tabla 2. Finalmente, fueron 15 los estudios que respondían las RQ y fueron usados para realizar el reporte descrito más adelante (Tabla 3).

Tabla 3. Estudios primarios recuperados

Autores	Título	Año
Almigheerbi, T. S., Ramsey, D., & Lamek, A	Evaluation of the Performance of Information Systems Implemented at the University of Tripoli, Libya	2019
Althonayan, M., & Althonayan, A	E-government system evaluation: the case of users performance using ERP systems in higher education	2017
Aparicio, M., Raposo, J., & Costa, C. J	A utilização de ERP em contexto de Ensino Superior	2018
Chaushi, B. A., Chaushi, A., Dika, Z., & Ismaili, F	Investigation of Higher Education ERP implementation factors	2018
Chaushi, B. A., Chaushi, A., & Ismaili, F	ERP systems in higher education institutions: Review of the information systems and ERP modules	2018
Dachyar, M., & Perkasa, M. I	Asset management improvement design in state university	2018
de Castro Silva, S. L. F., & de Oliveira, S. B	Planning and scope definition to implement ERP: The case study of Federal Rural University of Rio de Janeiro (UFRRJ)	2015
Fadelelmoula, A. A	The Impacts of the Quality Dimensions of the ERP System on the Realization of the Fundamental Business Objectives and Perceived Usefulness	2018
Leyh, C., Gebhardt, A., & Berton, P	Implementing ERP Systems in Higher Education Institutes Critical Success Factors Revisited	2017
Meissonier, R., Lapointe, L., & Houzé, E	Ensuring ERP Projects Achievement through Legitimizing Practices	2015
Ouyang, X., Zhong, J., & Liu, J.	Study on the Construction of Wisdom Campus based on University Resource Planning (URP)	2016
Ramírez, F. D. J. C., Henao, C. F., Villa, J. A. S. A., Alberto, D., Arango, G., Giraldo, L. F. G., & Cardona, M. A. M	Sistemas de información industriales y sistemas de información universitarios: estudio comparativo	2019
Santos, S. C., Santana, C., & Elhimas, J. M. C.	Critical success factors for ERP implementation in sector public: an analysis based on literature and a real case.	2018
Wanko, C. E. T., Kamdjoug, J. R. K., & Wamba, S. F	Study of a Successful ERP Implementation Using an Extended Information Systems Success Model in Cameroon Universities: Case of CUCA	2019
Zhao, F., Farmer, S., Alejandro, J., & Perez-Estrada, A	Green IS in Education Industry: A Case Study	2016

Cabe resaltar que los estudios sobre implementación de ERP y sus beneficios en la optimización de las IES, se desarrollan por todo el planeta, como se observa en la Figura 2, lo cual es una característica importante pues refleja que dichos sistemas de información se han convertido para la educación superior en un nuevo recurso TIC y además que son extrapolables a cualquier institución debido a la semejanza de sus procesos, es decir, se convierten en casos de éxito que pueden ser revisados en futuras implementaciones.



Figura 2. Distribución geográfica de la revisión de literatura de ERP en las Universidades

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización de las IES (RQ1)

Las IES se deben a lo social, la consolidación de conocimiento hace que su función traspase fronteras y establezcan objetivos que se enfocan a la consolidación de un mejoramiento hacia la humanidad. En este sentido y como generadora de saberes, la Universidad debe ser entendida como una organización eficaz, eficiente y efectiva, que se reconozca no solo como formadora, sino como actor integral de la economía basada en el conocimiento y colaboradora de políticas públicas, por lo tanto, se considera parte de los actores del ecosistema de Ciencia, Tecnología e Innovación formando la triple hélice entre Empresa-Universidad-Estado [11]. Desde el enfoque de la educación, la economía basada en conocimiento tiene un valor de uso y no de negocio, es decir, su comercio se enfoca hacia el poseer información. Esto permite que las condiciones económicas cambien y se puedan tomar decisiones que favorezcan dichas condiciones en una sociedad [12], así mismo la ocupación de la IES como empresa tiene como finalidad la transferencia de conocimiento y tecnología, que son los insumos para la innovación de los sectores económicos [13].

Ahora bien, la IES al ser considerada una empresa se comporta como tal y establece dentro de sí unos procesos que por lo general siguen el siguiente modelo (ver Figura 3).

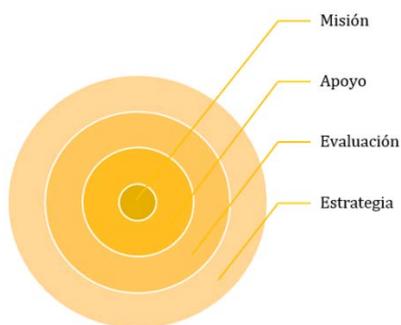


Figura 3. Modelo de procesos en una IES

Los procesos misionales se entienden como aquellos por lo que existe la IES, su razón de ser, y estos consideran las funciones sustantivas de formación, investigación y extensión social. Los procesos de apoyo establecen las acciones que conducen al cumplimiento de la misión y es en los cuales se operacionaliza la gestión de la universidad, dentro de ellos se pueden encontrar procesos legales, financieros, administrativos, de almacén e inventario, de servicios generales y mantenimiento de infraestructura, de recursos humanos, de gestión documental, de servicios al público, entre otros. Los procesos de evaluación conducen a la verificación de toda la operación universitaria de manera interna y externa, siendo estos conducidos y orientados por los procesos de estrategia que articulan las necesidades de la sociedad con la economía del conocimiento.

De acuerdo a la SLR y como se muestra en la Figura 4, el 39% de los estudios abordados mencionan que los ERP evaluados se implementan para los procesos de apoyo universitario. Sin embargo, es posible identificar que la tendencia a implementar sistemas de información orientados a procesos para la formación, la investigación y la extensión social no solo va en crecimiento, sino que son una necesidad. A partir de aquí concebir que las IES pueden optimizar sus procesos enfocados a los recursos humanos, financieros y de tiempo, información y conocimiento misionales pueda ser una realidad.

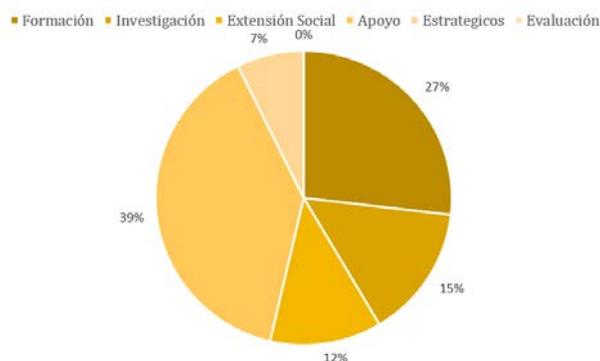


Figura 4. Procesos para los cuales se implantan ERP en las IES

También se pudo evidenciar que las universidades públicas, oficiales o estatales (es decir financiadas por los gobiernos) son quienes en su mayoría tienden a la implementación de ERP como herramienta para mejorar su gestión. Esto se ve implícito en su función social/legal, puesto que mientras la IES privada administra sus propios recursos, las oficiales operan con recursos de la comunidad, por lo cual están en la necesidad de establecer herramientas que les permitan ser transparentes, pero sobre todo contar con la suficiente información para demostrar que el uso de estos recursos se maximiza en funciones sociales y a su vez responder a los requerimientos legales. Es en este punto donde se puede concluir que la función de un ERP puede ser también orientada a la legitimización de los procesos de acuerdo a las características de las IES, como se observa en la Figura 5.

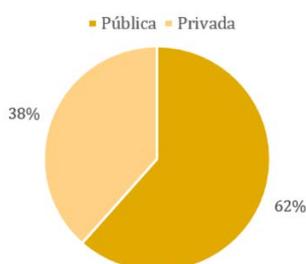


Figura 5. Fuentes de financiación de IES que implantan ERP

3.2 Manera en que los sistemas de información optimizan los procesos en las IES

Los estudios analizados establecen la relación directa entre la calidad en los procesos y sus herramientas de ERP. Dentro de los factores mencionados en la SLR se demostró que entre ellos se encuentran aspectos como Calidad de la información, Calidad del servicio, Apoyo en los procesos de negocio, Mejora en la toma de decisiones, Utilidad percibida, entre otros; en este sentido la información representa una base sólida para cualquier tipo de negocio, por lo que un ERP traslada un efecto positivo en la actuación de una institución [14]. Si bien es cierto la IES pública o privada tiene un fin social, no se puede desconocer que el uso de recursos es significativo dentro y para su operación, por lo tanto, la búsqueda de su optimización será una constante.

Esta optimización se entiende a nivel general como aquellas actividades que reducen efectivamente costos, mejoran la calidad del producto o el rendimiento de procesos; a ella se asocian factores como el análisis del desarrollo del producto, la prevención de incidencias, así como la evaluación de proyectos [15]. Sin embargo, para las IES la optimización estará relacionada con la prestación de servicios, a saber: 1) directos, por ejemplo, a los estudiantes, o 2) indirectos, por ejemplo, a la sociedad en general entregando conocimiento para el desarrollo. Por esta razón, este concepto debe ampliarse y plantear que la optimización de las IES debe redirigirse a lograr mejoras continuas en el sistema [16] y no solo a una reducción de costos.

Una vez identificado los procesos misionales de las IES, se procedió a determinar cuáles serían los aspectos más relevantes en un sistema de información que condujeran a su optimización, los resultados se enfocaron en términos de los procesos de apoyo, como administración del recurso humano, finanzas, contabilidad, inventarios, procesos de gestión; mientras que cuando se mencionaban procesos misionales se hacía alusión a sistemas de información académica, portal/CMS, espacios virtuales de aprendizaje, sistemas de biblioteca, también sistemas de búsqueda de información o software [17].

El 68% de los estudios mencionaron como ventajas importantes de un ERP a la reducción del tiempo entre actividades y los aspectos de modularidad, es decir la distribución por módulos, que permite la desconcentración de tareas y gestión de la información. En igual proporción se pudo evidenciar que en términos significativos la disponibilidad de la información es lo que conduce a las mejoras continuas, por lo que este aspecto es quizás de los más relevantes.

Por otra parte, aspectos mencionados en menor proporción, pero también significativos, señalan a la trazabilidad de la información en un 37%, como aquella característica que permite la evaluación y el seguimiento de los procesos y que deriva de la implementación de ERP. Aspectos como el control de riesgos y la protección de error contra el usuario no son tan notables, pero aparecen como alternativas válidas dentro de la mejora continua y proporcionan otras características a los sistemas de información que requieren las IES.

La Figura 6 muestra la distribución porcentual de los aspectos identificados en la SLR referentes a la optimización de procesos que conduce la implantación de un ERP en una IES.



Figura 6. Aspectos sobre la optimización de procesos en las IES

3.3 Características de los sistemas de información en las IES

En cuanto al análisis de lo que caracteriza un sistema de información, más allá de determinar que hace, se identificó cómo se organiza para hacerlo, puesto que en un proyecto de implantación de ERP, el cual implica cierto grado de complejidad y altos costos, necesita establecer además de los aspectos funcionales, los no funcionales y otras características fundamentales de desempeño y desarrollo [18]. En este sentido no son muchos los autores que ahondan sobre el tipo estructural. Sin embargo, se puede rescatar criterios importantes para la comparación de los ERP, a saber: 1) Comunicación de datos, 2) Almacenamiento distribuido, 3) Diseño para la eficiencia de usuario final, y 4) Entrada de datos [18].

La comunicación de datos se enfocó en identificar si el ERP podía proveer información a los usuarios internos, como estudiantes, personal docente e investigador, personal de administración y externos como empresas, proveedores y sociedad en general, basados en las necesidades de los grupos de interés de la universidad [19]. El almacenamiento

distribuido contempla el control y administración del software, el cual puede ser más autónomo y manejar un modo de ejecución más independiente en cuanto almacenamiento [20]. El diseño para la eficiencia del usuario final se considera como punto de función del sistema que contribuye a la facilidad que proporciona en relación con la interacción del usuario [21], en algunos casos se menciona la integridad de los datos como aspecto que contribuye al reconocimiento de la dificultad de perder datos o presentar incoherencias entre ellos [22] y finalmente la forma en que se ingresan los datos al software.

A partir de la SLR se pudo demostrar que los ERP que implementan las IES permiten la interacción del usuario interno y externo, siendo este último más reconocido dentro de las funcionalidades. Sin embargo, no todos los autores consideraron a los estudiantes y docentes como usuarios internos, sino solamente al personal administrativo. Esta diferencia de conceptos, fue la que inclinó la tendencia hacia un mayor porcentaje de los usuarios externos, entendiendo que la comunicación de datos se hace a la mayor cantidad de usuarios posibles, Figura 7.

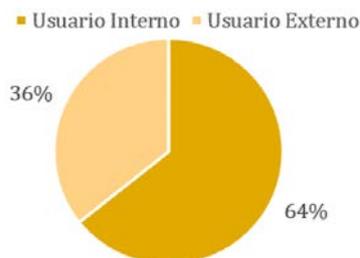


Figura 7. Comunicación de datos

Por otra parte, los estudios muestran que los ERP aún conservan un almacenamiento centralizado, que permite la administración y el control en un solo repositorio, esto se debe en gran medida porque el 42% mencionaron que las mismas universidades son quienes diseñan y aplican sus ERP y solo el 21% mencionó que se estableció un proceso para la adquisición de un software comercial. En este sentido el almacenamiento centralizado se debe a las características de hardware de las IES, Figura 8.

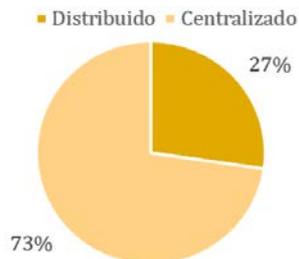
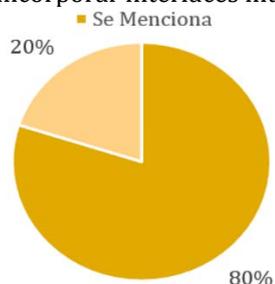


Figura 8. Almacenamiento distribuido

Con relación a la facilidad de uso que proporciona para el usuario los sistemas de información, la correspondencia para identificar este aspecto en la literatura revisada era complejo de estandarizar por los términos y la conceptualización tan diversa de estos. Por tal razón se propuso establecer si se mencionaba alguna característica de diseño, facilidad, diagramación, vista, interfaz, etc., para la ERP encontrando que el 80% de los estudios lo hacían. Esto es relevante en la medida en que un sistema debe permitir a los usuarios alcanzar sus objetivos y en el caso particular hacer más efectivo y eficiente los procesos, por lo cual es necesario incorporar interfaces intuitivas y fáciles de usar y



así alcanzar la máxima utilidad de los sistemas de información [23],
Figura 9.

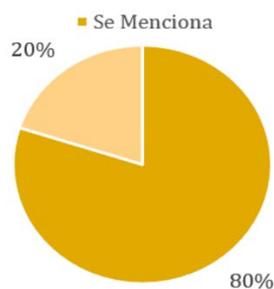


Figura 9. Diseño para la eficiencia de usuario final

Por lo que se refiere a la forma en que se realiza la entrada de datos a los sistemas de información, se pudo evidenciar que los ERP de las IES son en su mayoría semi-automatizados en cuanto a la entrada de los datos, esto significa que requieren entradas manuales, pero son capaces de transferir datos a otros módulos de manera automática. De esta manera podemos decir que aún se conserva el principio donde el ser humano es el responsable de la entrada de los datos y el software el responsable de procesarlos [24] (Figura 10).

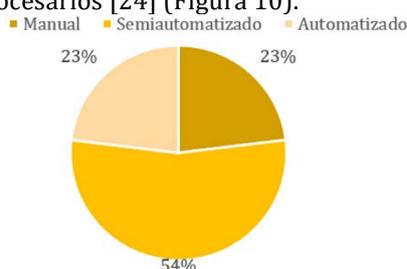


Figura 10. Entrada de datos

4. CONCLUSIONES

La SLR permitió identificar cómo se comportan los sistemas de información en las IES en cuanto a la optimización de procesos. Se puede decir que las IES por su estructura sistémica manejan un modelo basado en procesos que requiere atención en sus puntos críticos como el mejoramiento continuo de sus tiempos, recursos financieros, recursos humanos, relación con sus usuarios directos e indirectos y el proceso de toma de decisiones. En este sentido los ERP son los sistemas de información que permiten su gestión, administración y control. Aunque las IES tengan un fin social, es importante recalcar que están en una constante búsqueda de mejorar la disminución de sus costos, pues si son de carácter privado se requiere de maximizar utilidades y si son de carácter público se les exige maximizar sus beneficios y además se les hace control social.

Si bien es cierto, los ERP se consideran en su mayoría para la gestión de apoyo, en las IES encuentran mucho espacio en procesos académicos y estratégicos y permiten mejorar en ciertos aspectos. Este estudio reconoció que los sistemas de información de las IES se caracterizan por su modularidad, es decir presentar varios módulos que articulan información de manera semi-automatizada, de igual manera factores como la disponibilidad de la información, trazabilidad y reducción de tiempos son de los más reconocidos dentro de los beneficios que aportan a la optimización de procesos.

Por lo que se refiere a sus características se entiende que en su mayoría la programación de dichos sistemas es producto de las propias universidades, pues prefieren diseñarlos y adaptarlos a su quehacer, antes de adquirirlos de una firma comercial. Aspectos como la comunicación o transferencia de información con usuarios internos y externos es importante pues permite mayores funcionalidades, y a su vez se reconoce que se requiere de un diseño de interfaz sencillo y adecuado para optimizar la eficiencia para quien lo usa.

De igual forma se pudo evidenciar que la implantación de ERP en las IES se ha analizado y estudiado por todo el mundo. Esto es importante puesto que conocer los sistemas de información permite tomar y establecer buenas prácticas y referencias para los países latinoamericanos. Es posible encontrar mejoras en la implantación de los ERP en las IES que permitan la optimización de sus procesos a través de estudios encontrados en la literatura, puesto que las experiencias son diversas, adaptadas a casos particulares, sistémicos y específicos.

Finalmente, se puede concluir que los sistemas de información son herramientas de gestión que por su utilidad y versatilidad se implantaron en las empresas y han trascendido a todo tipo de estas incluyendo las IES. A su vez, las IES los han adoptado, adaptado y re-creado no solo para procesos de apoyo, sino también para sus procesos misionales y su fin social, lo que los ha elevado a ser de simples instrumentos, a consejeros decisorios.

REFERENCIAS

- [1] Mallar, M. (2010). La gestión por procesos: un enfoque de gestión eficiente. *Rev. Científica Visión Futur.* 13(1), 23-32.
- [2] Langenwalter, G. (2019). *Enterprise resources planning and beyond: integrating your entire organization.* CRC Press.
- [3] da Conceição, P. y González, F. (2010). Maximización de los beneficios de los sistemas ERP. *Inf. Syst. Technol. Manag.* 7(1), 5-32.
- [4] Kramer, E. (2005). Insis Ltda. y la industria de los sistemas ERP. *Acad. Rev. Latinoam. Adm.* 34, 79-105.
- [5] Hugos, M. (2018). *Essentials of supply chain management.* John Wiley & Sons.
- [6] Delago, J. y Marín, F. (2000). Evolución en los sistemas de gestión empresarial del MRP al ERP. *Dialnet* 331, 51-58.
- [7] Andonegi, J., Casadesús, M. y Zamanillo, I. (2005). Evolución histórica de los sistemas ERP: De la gestión de materiales a la empresa digital. *Rev. Dir. y Adm. Empres* 12(1), 61-72.
- [8] Rozenfeld, H. y de Senzi, E. (2000). Identificação das funcionalidades de desenvolvimento de productos de um sistema ERP. En *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.* Natal, Brasil.
- [9] García, F. (2011). La Universidad de la próxima década: La Universidad Digital. *Univ. y Desarro. Soc. la Web* 12, 181-197.
- [10] Kitchenham, B. y Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering.* EBSE 2007-001. Keele University and Durham University Joint Report.
- [11] González, R., Ochoa, S. y Celaya, R. (2016). Cultura organizacional y desempeño en instituciones de educación superior: Implicaciones en las funciones sustantivas de formación, investigación y extensión. *Univ. Empres.* 18(30), 13-31.
- [12] Quijano, G. (2017). The University: A Business or a Utopia? *Rev. Colomb. Educ.* 72, 221-241.
- [13] Sarabia, G. (2016). La vinculación universidad-empresa y sus canales de interacción desde la perspectiva de la academia, de la empresa y de las políticas públicas. *CienciaUAT* 10(2), 13-22.
- [14] Fadelmoula, A. (2018). The impacts of the quality dimensions of the ERP system on the realization of the fundamental business objectives and perceived usefulness. *Int. J. Enterp. Inf. Syst.* 14(4), 89-107.
- [15] Vinué, P. (2007). Optimización de productos y procesos industriales. *Gestión* 2000.
- [16] Alvarado, B. (2012). *Optimización de Procesos de Servicio.* EAE.
- [17] Chaushi, B., Chaushi, A. y Ismaili, F. (2018). ERP systems in higher education institutions: Review of the information systems and ERP modules. En *41st Int. Conv. Inf. Commun. Technol. Electron. Microelectron.* Roma, Italy.
- [18] Sánchez, P., García, J. y Ortiz, L. (2017). Metodología para la comparación de sistemas de planificación de recursos empresariales para servicios logísticos portuarios. *Ingeniare* 25(3), 547-560.
- [19] Aldeanuava, I. (2013). Los grupos de interés en el ámbito de la responsabilidad social universitaria: un enfoque teórico. *Anu. Jurídico y Económico Eскур.* 46(1), 235-254.
- [20] Pesado, P. et al. (2010). *Tecnología y aplicaciones en Sistemas de Software Distribuidos.* Omega.
- [21] Gramajo, R. et al. (2017). *Combinación de alternativas para la estimación de proyectos software.* CAPIS.
- [22] Cabello, M. (2010). *Introducción a las bases de datos relacionales.* Visión Libros.
- [23] Lozano, M. et al. (2016). Desarrollo y generación de interfaces de usuario a partir de técnicas de análisis de tareas y casos de uso. *Intel. Artif.* 6(16), 45-61.
- [24] Sommerville, I. y Galipienso, M. (2015). *Ingeniería del software.* Pearson Educación.

En el presente proyecto de investigación se planteó el estudio del proceso de fabricación de yogurt de la empresa de productos lácteos. Con el fin de medir la eficiencia del proceso y la productividad de los trabajadores utilizando correctamente los recursos con los que cuenta la empresa. Para el levantamiento de los tiempos se lo realizó con el método por cronometraje de regresión a cero con lo que se establecieron los tiempos de cada área de trabajo, obteniendo un total de 7:20:50 de tiempo normal empleado. Para la reducción de tiempos y movimientos se eliminó y combino actividades lo que permitió reducir los tiempos innecesarios que no agregaban ningún valor, obteniendo un tiempo estándar de 5:34:04, y se consiguió aumentar en un 49% la productividad de la mano de obra en el proceso, también se consiguió que la productividad global del proceso actual incremente en el 37%.

1. INTRODUCCIÓN

La Pasteurizadora es una empresa dedica a la elaboración de productos lácteos (yogures, queso, leche, dulce de leche). Siendo la fabricación de yogurt uno de los principales productos. Sabiendo que una de las áreas fundamentales de las empresas industriales son los procesos ya que de estos depende gran parte de la calidad del producto y la satisfacción del cliente.

El problema se origina desde la recepción de la materia prima, debido a que no cuenta con un horario fijo. El horario varía de 08:00h am hasta las 10:30h am, durante el tiempo de espera los trabajadores no realizan sus actividades lo cual genera una pérdida de tiempo por este motivo el trabajador no almacena el producto terminado dentro de su jornada laboral siendo un inconveniente para la empresa ya que tiene que pagar horas extras para que termine de almacenar las gavetas de yogurt en el cuarto frio. Posteriormente, la leche pasa a los tanques de pasteurización (marmitas) que tienen una capacidad de 1.000 litros diarios de leche, y la empresa cuenta con tres marmitas, sin embargo, se trabaja con una marmita y con 500 litros de leche subutilizando la capacidad instalada de la Empresa de Productos Lácteos.

El problema principal son los cuellos de botella que generan demoras y baja de productividad de la industria. La hipótesis planteada es: El estudio del proceso de fabricación del yogurt permitirá mejorar la productividad de la Empresa de Productos Lácteos. El objetivo genera es realizar un estudio del proceso en la elaboración del yogurt en la empresa de productos lácteos, mediante el análisis de tiempos y movimientos para proponer un mejoramiento continuo dentro de los mismos.

2. MÉTODO

El método de regresos a cero tiene tanto ventajas como desventajas en comparación con la técnica de tiempo continuo. Algunos analistas del estudio de tiempos usan ambos métodos, con la creencia de que los estudios en los que predominan los elementos largos se adaptan mejor a las lecturas con regresos a cero, mientras que los estudios de ciclo corto se ajustan mejor al método continuo [1]. El estudio se realizará en la Empresa de productos lácteos a todos los trabajadores del área de producción con el método de regreso a cero.

2.1 Cálculo del número de observaciones

La importancia de calcular el número de observaciones es determinar el valor del promedio representativo para cada elemento, en el estudio se utilizará el método tradicional que indica tomar una muestra 10 lecturas si los ciclos son ≤ 2 minutos y 5 lecturas si los ciclos son ≥ 2 minutos [2].

2.2 Cálculo del rango

Se calcula el rango aplicando la ecuación (1) de las lecturas [3].

$$R(\text{rango}) = X_{\max} - X_{\min} \quad (1)$$

Cálculo de la media aritmética o promedio con la ecuación (2) de las lecturas.

$$X = \Sigma x/n \quad (2)$$

Hallar el cociente entre rango y la media con la ecuación (3) con el dato obtenido pasa a la tabla de cálculo del número de observaciones.

$$R = X/R \quad (3)$$

En gran medida la atención del estudio de tiempos depende de la naturaleza de la operación individual, el número de ciclos que debe observarse para obtener un tiempo medio representativo de una operación se determina mediante el siguiente procedimiento [4]. Una vez calculado el coeficiente entre rango y la media se ubica el valor correspondiente al número de muestras realizadas ya sea de 5 o 10. Tiene un nivel de confiabilidad del 95% y un nivel de precisión de $\pm 5\%$. En la Figura 1 se muestra la tabla de cálculo.

TABLA PARA CALCULO DEL NUMERO DE OBSERVACIONES					
R/X	5	10	R/X	5	10
0	0	0	0.48	68	39
0.01	1	1	0.50	74	42
0.02	1	1	0.52	80	46
0.03	1	1	0.54	86	49
0.04	1	1	0.56	93	53
0.05	1	1	0.58	100	57
0.06	1	1	0.60	107	61
0.07	1	1	0.62	114	65
0.08	1	1	0.64	121	69
0.09	1	1	0.66	129	74
0.10	3	2	0.68	137	78
0.12	4	2	0.70	145	83
0.14	6	3	0.72	153	88
0.16	8	4	0.74	162	93
0.18	10	6	0.76	171	98
0.20	12	7	0.78	180	103
0.22	14	8	0.80	190	108
0.24	13	10	0.82	199	113
0.26	20	11	0.84	209	119
0.28	23	13	0.86	218	126
0.30	27	15	0.88	229	131
0.32	30	17	0.90	239	138
0.34	34	20	0.92	250	143
0.36	38	22	0.94	261	149
0.38	43	24	0.96	273	156
0.40	47	27	0.98	284	162
0.42	52	30	1.00	296	169
0.44	57	33	1.02	303	173
0.46	63	36	1.04	313	179

Figura 1. Tabla para el cálculo del número de observaciones

2.3 Tiempo promedio

Para la elaboración del tiempo promedio por elemento se aplica la ecuación (4).

$$Te = \frac{\sum Xi}{LC} \quad (4)$$

Donde:

Te = Tiempo promedio

$\sum Xi$ = Sumatoria de lecturas

LC = Lecturas consistentes

2.4 Tiempo normal

Para este caso se debe tomar en cuenta la valoración el ritmo de trabajo del operario para ello se aplica la ecuación (5) para un solo ritmo y la ecuación (6) para varios ritmos de trabajo

$$Tn = Te * Valor Atribuido/Valor Estándar \quad (5)$$

$$Tn = Te * \sum \text{Valor} \frac{\text{Atribuido}}{\text{Valor}} \text{Estándar} * LC \quad (6)$$

Para calcular el tiempo concedido elemental (Tt) se realiza la suma de los suplementos concedidos por cada elemento y se utiliza la ecuación (7) para una actividad.

$$Tt = Tn * (1 * Suplemento) \quad (7)$$

Para el tiempo concedido total (Ttc) se calcula la frecuencia por operación es decir cuántas veces se repite un elemento para realizar una pieza, se debe utilizar la ecuación (8).

$$Ttc = Tt * Frecuencia \quad (8)$$

2.5 Tiempo estándar

El tiempo estándar es la sumatoria de los tiempos totales concedidos para cada elemento que forma parte de la operación. Usar la ecuación (9).

$$\text{Tiempo estándar} = \sum Ttc \quad (9)$$

2.6 Valoración del ritmo de trabajo y desempeño estándar

Como el tiempo real requerido para ejecutar cada elemento del estudio depende en un alto grado de la habilidad y esfuerzo del operario, es necesario ajustar hacia arriba el tiempo normal del operario bueno y hacia abajo el del

operario deficiente hasta un nivel estándar. Por lo tanto, antes de dejar la estación de trabajo, los analistas deben dar una calificación justa e imparcial al desempeño en el estudio [5]. Para ejecutar el estudio de tiempos se debe seleccionar al trabajador más calificado, de esta manera los tiempos arrojados por el estudio será más confiables. El trabajador experimentado realiza las actividades a un ritmo normal y está por encima del trabajador promedio, ya que cuenta con la experiencia, habilidad, destreza y conocimiento necesario para realizar su trabajo de forma segura y satisfactoria. El analista evalúa la eficiencia del operario en base a la rapidez con que realiza sus actividades, y procede asignar un porcentaje de valoración, generalmente se considera ritmo normal cuando se califica con el 100% de velocidad, pero si la calificación es de 110%, quiere decir que el operario actúa a una velocidad del 10% por encima del normal, y si actúa a una velocidad del 90 %, da a notar que el operario trabaja a una velocidad por debajo de lo normal. El analista realiza una primera estimación en base al contenido de la Figura 2 procedimientos de calificación por velocidad que a continuación se detalla.

ESCALA	DESCRIPCIÓN DEL DESEMPEÑO	VELOCIDAD DE MARCHA
50%	Muy lento, movimientos torpes e inseguros, el operario parece medio dormido y sin interés al trabajo	3.2 Km /hr.
75%	Ritmo constante, sin peso como de obrero no pagado o desatendido pero vigilado, parece lento pero no pierde el tiempo adrede mientras lo observa	4.8 Km /hr.
100%	Ritmo normal, activo como de obrero calificado a destajo logra con tranquilidad el nivel de calidad y precisión fijado	6.4 Km /hr.
125%	Ritmo muy rápido, el operario actúa con gran seguridad, destreza y coordinación de movimientos muy por encima del obrero calificado	8.0 Km /hr.
150%	Ritmo excepcional, rápido concentración y esfuerzo intenso sin probabilidad de darse largos periodos	9.6 Km /hr.

Figura 2. Calificación de la actuación por velocidad

2.7 Suplementos

Ningún operario puede mantener un paso estándar todos los minutos del día de trabajo. Pueden ocurrir tres clases de interrupciones para las que debe asignarse tiempo extra. La primera son las interrupciones personales, como viajes al baño y a tomar agua; la segunda es la fatiga que afecta incluso a los individuos más fuertes en los trabajos más ligeros. La tercera, son los retrasos inevitables, como herramientas que se rompen, interrupciones del supervisor, pequeños problemas con las herramientas y variaciones del material, todos ellos requieren la adición de una holgura. Como el estudio de tiempos se realiza durante un periodo relativamente corto y como los elementos extraños se deben retirar al determinar el tiempo normal, debe añadirse una holgura al tiempo normal a fin de llegar a un estándar justo que un trabajador pueda lograr de manera razonable [6] se utilizará la tabla de suplementos de la OIT [7].

Una vez calculado los tiempos básicos o normales es importante calcular el porcentaje de los suplementos, que se sumaran a los tiempos normales, es un margen de tolerancia que se da por el retraso, interrupción o disminución del trabajo, producidos por la fatiga los efectos fisiológicos y psicológicos que se presentan al realizar un determinado trabajo en la Figura 3 se muestra los suplementos.

SISTEMA DE SUPLEMENTOS POR DESCANSO							
SUPLEMENTOS CONSTANTES	Hombre	Mujer	SUPLEMENTOS VARIABLE	Hombre	Mujer		
Necesidades personales	5	7	e) Condiciones atmosféricas				
Básico por fatiga	4	4	Índice de enfriamiento, termómetro de Kca (milicalorías/cm²segundo)				
SUPLEMENTOS VARIABLE							
a) Trabajo de Pie			16	0			
Trabajo de pie			14	0			
			12	0			
			10	3			
b) Postura anormal			8	10			
Ligeramente incómoda			0	1	2.1		
Incómoda (inclinada)			2	3	3.1		
Muy incómoda (echado, estirado)			7	7	4.5		
					6.4		
c) Uso de la fuerza o energía muscular (levantar, tirar o empujar)			2		100		
Peso levantado por kilogramo							
			f) Tensión visual				
2.5			0	1	Trabajos de cierta precisión	0	0
3			1	2	Trabajos de precisión o fatigosa	2	2
7.5			2	3	Trabajos de gran precisión	5	5
10			3	4	g) Ruido		
12.5			4	6	Continuo	0	0
15			5	8	Intermitente y fuerte	2	2
17.5			7	10	Intermitente y muy fuerte	5	5
20			9	13	Extrínseco y muy fuerte	7	7
22.5			11	16	h) Tensión mental		
25			13	20 (mks.)	Proceso algo complejo	1	1
30			17	-	Proceso complejo o atención dividida	4	4
33.5			22	-	Proceso muy complejo	8	8
					i) Monotonía mental		
Monotonía					Trabajo algo monótono	0	0
Ligeramente por debajo de la potencia calculada			0	0	Trabajo bastante monótono	1	1
					Trabajo muy monótono	4	4
					j) Monotonía física		
Bastante por debajo			2	2	Trabajo algo aburrido	0	0
Absolutamente insuficiente			5	5	Trabajo aburrido	2	1
					Trabajo muy aburrido	5	2

Figura 3. Sistema de suplementos por descanso

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Distribución actual de la Empresa

En la Figura 4 se aprecia la distribución actual de la empresa.

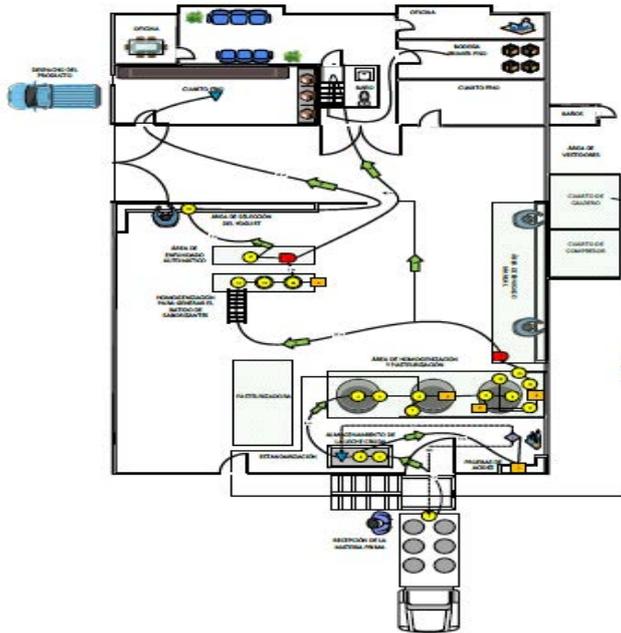


Figura 4. Distribución actual de la empresa

3.2 Tiempos actuales para el proceso de la fabricación del yogurt

PRODUCTOS LÁCTEOS LEITO												
MATERIA PRIMAS				MATERIA PROPIETARIA				RESUMEN				
DESCRIPCIÓN DE LA PARTE												
DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN: FABRICACIÓN DEL YOGURT												
ORDEN	ACTIVIDAD	TIEMPO		DESCRIPCIÓN	MATERIA PRIMAS	MATERIA PROPIETARIA	ANÁLISIS	MATERIA PRIMA	MATERIA PROPIETARIA	ANÁLISIS	MATERIA PRIMA	MATERIA PROPIETARIA
		INICIAL	FINAL									
1	Recepción de la materia prima	0:00:00	0:00:00									
2	Preparar el yogurt	0:00:00	0:00:00									
3	Transferir la leche cruda al yogurt de	0:00:00	0:00:00									
4	Estabilización (regulación de contenido de grasa y	0:00:00	0:00:00									
5	Almacenamiento de la leche cruda	0:00:00	0:00:00									
6	Crear un medio al condón de azúcar	0:00:00	0:00:00									
7	Control de la azúcar	0:00:00	0:00:00									
8	Homogenización	0:00:00	0:00:00									
9	Clorar la leche a las mañanitas para la	0:00:00	0:00:00									
10	Cubar la leche dentro de la mañanita	0:00:00	0:00:00									
11	Pasteurización	0:00:00	0:00:00									
12	Prender el azúcar	0:00:00	0:00:00									
13	Medir volúmenes de agua	0:00:00	0:00:00									
14	Verificar temperatura	0:00:00	0:00:00									
15	Adición de azúcar	0:00:00	0:00:00									
16	Homogenización	0:00:00	0:00:00									
17	Medir volúmenes (agua, azúcar)	0:00:00	0:00:00									
18	Verificar la temperatura	0:00:00	0:00:00									
19	Transferir al fermento	0:00:00	0:00:00									
20	Inspección	0:00:00	0:00:00									
21	Agregar el fermento	0:00:00	0:00:00									
22	Demora	0:00:00	0:00:00									
23	Refrigeración	0:00:00	0:00:00									
24	Llevar el yogurt a los tanques de almacenamiento	0:00:00	0:00:00									
25	Inspección para el control de calidad	0:00:00	0:00:00									
26	Asesorar sobre volúmenes (agua, azúcar, fermento)	0:00:00	0:00:00									
27	Verificar temperatura del subproducto	0:00:00	0:00:00									
28	Demora	0:00:00	0:00:00									
29	De fermento	0:00:00	0:00:00									
30	Transferir de fermento y azúcar	0:00:00	0:00:00									
31	Colocar las frutas en la mañanita	0:00:00	0:00:00									
32	Transferir y adición de grasas	0:00:00	0:00:00									
33	Inspección de la mañanita	0:00:00	0:00:00									
34	Inspección del yogurt	0:00:00	0:00:00									
35	Clasificación y empaquetado	0:00:00	0:00:00									
36	Almacenamiento	0:00:00	0:00:00									
37	Transferir de azúcar al yogurt de	0:00:00	0:00:00									
38	Almacenar el producto terminado	0:00:00	0:00:00									
TOTAL					20	8	4	2	8			7:30:00

Figura 5. Diagrama de flujo de procesos actual

La empresa de productos lácteos durante su funcionamiento hasta el momento no ha realizado ningún tipo de estudio que permita optimizar los tiempos del proceso, es importante señalar que tienen algunas dificultades al momento de realizar las actividades que se realiza de forma práctica, este estudio permite conocer el tiempo normal para la fabricación del yogurt e identificar las actividades que demandan mayor tiempo de ejecución. Los procesos que intervienen para la elaboración del yogurt son:

- Recepción de la materia prima
- Homogenización
- Pasteurización
- Enfriamiento
- Incubación
- Batido
- Enfundado
- Almacenamiento

A continuación, se detalla el cálculo de número de observaciones para tener una confiabilidad del 95% de los tiempos observados de cada uno de los procesos antes mencionados (Figuras 6 a 16), para mayor facilidad de cálculo se elaboró una tabla de Excel en la que se introdujo las ecuaciones antes mencionada y se calculan todos los datos que se requieren.

CÁLCULO DEL NÚMERO DE OBSERVACIONES																		
RECEPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	TIEMPO PRELIMINAR										Media	Desviación Estándar	LÍMITES		Rango	Media	Rango/Media	Número de Observaciones
	DESCRIPCIÓN	Obs 1	Obs 2	Obs 3	Obs 4	Obs 5	Obs 6	Obs 7	Obs 8	Obs 9			Obs 10	LCI				
Preparar el tanque	0:15:51	0:17:32	0:14:58	0:18:55	0:19:23						0:17:19	0:01:55	0:15:24	0:19:14	0:03:04	0:17:26	0:18	10
Trasladar la leche cruda al tanque de almacenamiento	0:05:24	0:05:34	0:06:14	0:05:12	0:07:39						0:06:05	0:01:08	0:04:57	0:07:13	0:00:40	0:05:36	0:12	4
Regulación de contenido sólidos y no grasos (estandarización)	0:16:58	0:14:33	0:17:32	0:15:20	0:16:21						0:16:09	0:01:13	0:14:56	0:17:21	0:01:38	0:16:13	0:10	3
Almacenamiento de la leche cruda	0:08:30	0:07:39	0:09:45	0:08:12	0:07:59						0:08:25	0:00:48	0:07:37	0:09:13	0:00:51	0:08:05	0:11	4
Llevar muestra al control de ácidos	0:03:13	0:02:59	0:02:22	0:03:26	0:04:56						0:03:23	0:00:57	0:02:26	0:04:20	0:00:27	0:03:13	0:14	6
Control de ácidos	0:03:09	0:02:19	0:02:49	0:03:02	0:04:03						0:03:04	0:00:38	0:02:26	0:03:42	0:00:20	0:03:00	0:11	4

Figura 6. Número de observaciones en la recepción de materia prima

DESCRIPCIÓN	TIEMPOS OBSERVADOS									
	Obs 1	Obs 2	Obs 3	Obs 4	Obs 5	Obs 6	Obs 7	Obs 8	Obs 9	Obs 10
Preparar el tanque	00:15:51	00:17:32	00:13:56	00:18:55	00:15:23	00:14:32	00:16:02	00:15:16	00:18:04	00:17:29
Trasladar la leche cruda al tanque de almacenamiento	00:05:24	00:05:34	00:06:14	00:05:12	00:05:10					
Regulación de contenido sólidos y no grasos (estandarización)	00:16:58	00:15:20	00:16:21	00:15:19	00:16:55					
Almacenamiento de la leche cruda	00:08:30	00:07:39	00:08:12	00:09:07	00:07:45					
Llevar muestra al control de ácidos	00:03:13	00:02:59	00:02:45	00:03:26	00:04:32	00:03:25				
Control de ácidos	00:03:09	00:02:06	00:02:49	00:03:02	00:02:13					

Figura 7. Tiempos dentro del rango

DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO	TIEMPO NORMAL										Suma	Tiempo normal	
	Obs 1	Obs 2	Obs 3	Obs 4	Obs 5	Obs 6	Obs 7	Obs 8	Obs 9	Obs 10			
Preparar el tanque													
Tiempo observado	00:15:51	00:17:32	00:13:56	00:18:55	00:15:23	00:14:32	00:16:02	00:15:16	00:18:04	00:17:29			
Valorción	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	02:02:15	00:12:14	
Tiempo normal	00:11:53	00:13:09	00:10:27	00:14:11	00:11:32	00:10:54	00:12:02	00:11:27	00:13:33	00:13:07			

Figura 8. Tiempo normal preparación del tanque

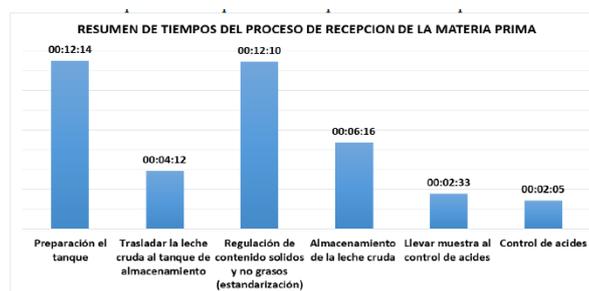


Figura 9. Resumen de tiempos del proceso de recepción de materia prima



Figura 10. Resumen de tiempos del proceso de enfriamiento



Figura 11. Resumen de tiempos del proceso de incubación

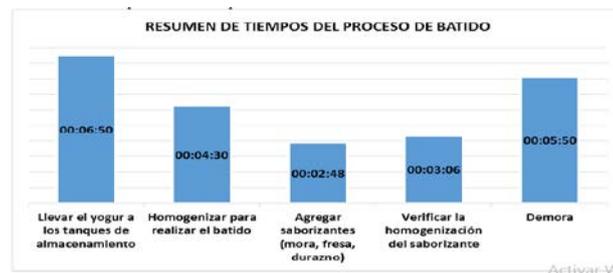


Figura 12. Resumen de tiempos del proceso de incubación

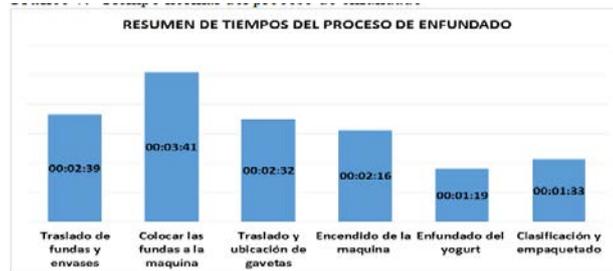


Figura 13. Resumen de tiempos del proceso de enfriamiento



Figura 14. Resumen de tiempos del proceso de almacenamiento

TIEMPOS DE CICLO DE PRODUCCIÓN ACTUAL		horas
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE RECEPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA		0:39:29
RESUMEN DE TIEMPOS DE HOMOGENIZACIÓN		0:13:36
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN		0:17:59
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO		0:10:24
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE INCUBACIÓN		5:17:43
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE BATIDO		0:23:03
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE ENFUNDADO		0:13:59
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE ALMACENAMIENTO		0:04:35
TIEMPO TOTAL DE CICLO		7:20:50

Figura 15. Resumen de tiempos de la producción actual

METODO ACTUAL	
Unidades producidas al día	14400
Horas trabajadas	8
Productividad mano de obra por hora	1800
Productividad global	\$1.99

Figura 16. Productividad global del proceso actual de producción

3.3 Optimización de los tiempos en el proceso de elaboración del yogurt

En el diseño propuesto se observa que el flujo de proceso en la elaboración del yogurt mejoro con la eliminación y modificación de actividades dentro de la recepción de la materia prima y la homogenización que no agregaban valor en el proceso por ende el tiempo de ciclo era muy extenso. La modificación propuesta (Figura 17) no requiere de la construcción de nuevas áreas que generen gastos a la empresa, está más enfocado en la organización de las actividades que realiza el trabajador en su puesto de trabajo, esto permitirá que la valoración del ritmo de trabajo sea valore al 100%.

PRODUCTOS LÁCTEOS LEITO											
SITUACIÓN ACTUAL			SITUACIÓN PROPUESTA			DIFERENCIA			ANÁLISIS		
DESCRIPCIÓN DE LA PARTIDA:											
DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN: FABRICACIÓN DEL YOGURT											
RESUMEN		ACTUAL		PROPUESTO		DIFERENCIA		ANÁLISIS			
OPERACIÓN	NÚMERO	TIEMPO	NÚMERO	TIEMPO	OPERACIONES	TIEMPO	TIEMPO	TIEMPO	TIEMPO	TIEMPO	TIEMPO
1	Recepción de la materia prima	10	0:08:30	14	0:10:15	4	1:36:45	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
2	Preparar el tanque	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
3	Llevar muestra al control de acidez	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
4	Control de la acidez	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
5	Estandarización (regulación de contenido de grasa y sólidos no grasos)	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
6	Trasladar la leche cruda al tanque de almacenamiento	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
7	Homogenización	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
8	Llevar la leche a las cámaras para la homogenización	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
9	Pasteurización	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
10	Transferir al enfriador	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
11	Abstr. sólidos de agua	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
12	Verificar temperatura	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
13	Adición de azúcares	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
14	Refundado	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
15	Abstr. sólidos (grasa, azúcar)	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
16	verificación temperatura	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
17	Transferir al fermentador	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
18	Incubación	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
19	Agregar al fermentador	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
20	Cámara	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
21	Batido	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
22	Transferir yogurt a los tanques de almacenamiento	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
23	Homogenizar para realizar el batido	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
24	Agregar los saborizantes (frutas, crema, azúcar)	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
25	Verificar homogenización del saborizante	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
26	Cámara	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
27	Refundado	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
28	Transferir de bombas y procesos	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
29	Colocar las bombas en la máquina	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
30	Transferir y volubilidad de proteínas	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
31	Enfriador de la máquina	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
32	Refundado del yogurt	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
33	Clasificación y empacado	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
34	Almacenamiento	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
35	Transferir de bombas al punto de	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
36	Almacenar el producto terminado	1	0:00:00	1	0:00:00	0	0:00:00	1000	00:00:00	00:00:00	00:00:00
TOTAL		38	0:00:00	38	0:00:00	0	0:00:00	38000	00:00:00	00:00:00	00:00:00

Figura 17. Diagrama de operaciones propuesto

Actualmente en el proceso de recepción de la materia prima tiene seis actividades en el siguiente orden: preparar el tanque, trasladar la leche cruda al tanque de almacenamiento, regulación de contenido grasa y sólido no grasos, almacenamiento de la leche, llevar la muestra para el control de acidez y control de acidez. Al ser el control de acidez el último paso para dicho proceso genera inconvenientes debido a que en ciertas ocasiones se tuvo que devolver la leche a los proveedores por no cumplir el grado de acidez, generando pérdidas de tiempo. Por lo que se propone el nuevo orden de las actividades y la eliminación de actividades que retrasan el proceso y no agregan valor (Figuras 18 y 19).

TIEMPOS DE CICLO DE PRODUCCIÓN PROPUESTA	TIEMPO
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE RECEPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	0:30:02
RESUMEN DE TIEMPOS DE HOMOGENIZACIÓN	0:07:48
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN	0:14:07
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO	0:08:10
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE INCUBACIÓN	4:01:03
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE BATIDO	0:18:10
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE ENFUNDADO	0:11:16
RESUMEN DE TIEMPOS DEL PROCESO DE ALMACENAMIENTO	0:03:28
TIEMPO TOTAL DE CICLO	5:34:04

Figura 18. Resumen de tiempos de la producción propuesta

INCREMENTO DE LA PRODUCTIVIDAD	
METODO PROPUESTA	
Unidades producidas al día	21576
Horas trabajadas	8
Productividad mano de obra por hora	2697
Productividad global	\$2.73

Figura 19. Productividad global del proceso propuesta de mejora

3.4 Cálculo de la tasa de variación de la productividad global del proceso antiguo con el proceso propuesto

El clima y la cultura organizacional constituyen dos componentes de esencial importancia para la elevación de la productividad laboral [8]. La apertura, la innovación, la evaluación mediante indicadores adecuados son nortes que se deben lograr para el mejoramiento de calidad y productividad [9]. Para calcular usamos la ecuación (10).

$$G = \frac{P \text{ propuesto} - P \text{ actual}}{P \text{ actual}} \times 100$$

$$G = \frac{2.73 - 1.99}{1.99} \times 100 \quad (10)$$

$$G = 37\%$$

3.5 Cálculo de la tasa de variación de la productividad de la mano de obra

En todo sistema de gestión, la planeación sirve como marco de referencia a los programas de control. Adoptar buenas metodologías de seguimiento que acompañen a los procesos de planeación, con miras a lograr un buen desempeño en la gestión y alcanzar las metas [10]. El ejemplo típico es la productividad de la mano de obra, que resulta del cociente entre una medida dada del total de los bienes y servicios producidos y una medida de la mano de obra empleada [11]. Para calcular usamos la ecuación (11).

$$M. O. = \frac{P \text{ propuesto} - P \text{ actual}}{P \text{ actual}} \times 100$$

$$M. O. = \frac{2696 - 1800}{1800} \times 100 \quad (11)$$

$$M. O. = 49\%$$

4. CONCLUSIONES

Al realizar el estudio y con la propuesta determinada del cambio de las actividades y eliminación de actividades innecesarias se disminuyó el tiempo de ciclo de 7h20 a 5h34 en un 26%. Lo que significa que en un día de proceso puedo producir más unidades incrementando la productividad.

Se incrementó la productividad de la materia prima de 500 a 700 litros diarios en un 40%. Esto significa que puedo producir 200 litros al día aumentando la capacidad de producción y la rentabilidad.

Incremento de la productividad de la mano de obra de 1800 und/hora a 2696 und/hora. En un 49%. Como redujimos el tiempo de producción se aumentó la productividad de la mano de obra ahora pueden producir más litros de yogurt en el día con el mismo salario, pero incrementando la productividad.

Con la aplicación del estudio de tiempos y la reducción de tiempos, eliminación de actividades innecesarias el incremento de la productividad de la mano de obra se pudo incrementar la productividad Global se incrementó de \$1.99 a \$2.73, en un aumento 37%. Lo que significa que la industria puede ser más competitiva y generar rentabilidad con su producto.

REFERENCIAS

- [1] Freivalds, A. (2014). Ingeniería industrial de Niebel: Métodos, estándares y diseño del trabajo. McGraw-Hill.
- [2] Criollo, R. y Magaña, J. (2005). Estudio del trabajo. McGraw Hill.
- [3] Parra, J. (1995). Estadística descriptiva e inferencial I. Recuperado: http://www.Academia.edu/download/35987432/ESTADISTICA_DESCRPTIVA_E_INFERENCIAL.pdf.
- [4] García, R. (2000). Estudio del trabajo, ingeniería de métodos. McGraw-Hill.
- [5] Niebel, B. y Freivalds, A. (2014). Métodos, estándares y diseño del trabajo. Omega.
- [6] Neira, A. (2006). Técnicas de medición del trabajo. FC Editorial.

- [7] Estellés, M. et al. (2013). Una revisión de las Tablas de Suplementos de la Organización Internacional del Trabajo. Dirección y Organización, (49), 64-72.
- [8] Salazar, J. et al. (2009). Clima y cultura organizacional: Dos componentes esenciales en la productividad laboral. Acimed, 20(4), 67-75.
- [9] Rodríguez, F. y Gómez, L. (1991). Indicadores de calidad y productividad de la empresa. Esparsa.
- [10] Aguilar, G. y Hernández, T. (2007). Seguimiento de la productividad en obra: técnicas de medición de rendimientos de mano de obra. Revista UIS ingenierías, 6(2), 45-59.
- [11] Carro, R. y González, D. (2012). Productividad y competitividad. Omega.

Mary Alejandra Mendoza Pérez
Flor Nancy Díaz-Piraquive
Yasser de Jesús Muriel-Perea
Universidad Católica de Colombia
Colombia

Este capítulo tiene como objetivo identificar y analizar características específicas de la Cuarta Revolución Industrial en las pequeñas y medianas empresas. Con este propósito, se realizó una revisión sistemática de literatura y un análisis de tendencias sobre el tema, a través del software de minería de datos VantagePoint®. Los resultados obtenidos reflejan la necesidad latente de desarrollo de habilidades específicas para implementar tecnologías de innovación digital a bajo costo. El interés está creciendo en Europa, pero América Latina está dando hasta ahora sus primeros pasos en la investigación alrededor del tema. Las pequeñas y medianas empresas abarcan más del 90% de la economía global lo cual lo hace un tópico de crecimiento global y de gran impacto para el cambio social. De igual forma, se resaltó la necesidad de crear una cultura institucional en donde se adopten políticas relacionadas a la apropiación de la tecnología y manejo del cambio, para el beneficio económico e impacto social positivo, la tendencia central está ligada a la sociedad del conocimiento, manejo de la información y fomento de competencias blandas para la adopción del desarrollo.

1. INTRODUCCIÓN

Las revoluciones industriales se caracterizan por representar cambios disruptivos que afectan a la sociedad en su conjunto. A lo largo de la historia se reconocen cuatro revoluciones industriales : primera revolución, se dio en el siglo XVIII y se caracterizó por el paso de la producción manual a la producción mecanizada; segunda revolución industrial; segunda , se dio en el siglo XIX y su principales característica fue la aparición de la electricidad y la producción en masa; la tercera, originada a mediados del siglo XX y su principal característica fue la aparición del computador; laCuarta, originada en 2011 en la feria de Hannover y se caracteriza por la fábrica inteligente y los sistemas ciberfísicos. La Industria 4.0 es una tendencia que genera impactos directos en el futuro de los sistemas productivos en países industrializados [1]. Esta industria se encuentra representada en diversas tecnologías que se han desarrollado en los últimos años, en grandes escenarios industriales.

En esta revolución, entendida por algunos autores como Cuarta Revolución Industrial, se abordan tecnologías que permiten una adecuada recopilación de datos, procesos de manufactura inteligente y toma de decisiones en tiempo real [2]. En esta dinámica, también se muestran como relevantes los desarrollos tecnológicos asociados a la comunicación inteligente, la integración de información de diferentes agentes para toma decisiones y la generación de modelos de negocio eficientes. Estos grandes desarrollos de nueva tecnología se ven evidenciados en países industrializados y empresas con gran capacidad de inversión para su desarrollo futuro.

A nivel de revisión científica y publicaciones, ha sido evidente el impacto mundial y desarrollo que se ha tenido alrededor del tema. Es en ese orden de ideas, esta investigación tiene como propósito revisar la utilización de esta Cuarta revolución en pequeñas y medianas empresas de Latinoamérica. Considerando la economía formal, las Mipymes representan el 99,5% de las empresas de la región y la gran mayoría son microempresas (88,4% del total) [3]. Lo anterior con el objetivo de identificar de tendencias asociadas al estudio de la Industria 4.0 en las pequeñas y medianas empresas de la región, desde la perspectiva investigativa, para favorecer y agilizar su apropiación.

2. MARCO CONCEPTUAL

La Cuarta Revolución Industrial se caracteriza por la generación, flujo y consumo de grandes volúmenes de información, entre las organizaciones y sus diferentes públicos de interés. El aprovechamiento de esta información y su conversión en conocimiento permite apalancar la ventaja competitiva de las empresas; por tanto, en la actual sociedad del conocimiento, la información es considerada un recurso clave. La implantación de tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial en los procesos de las empresas requiere, principalmente, de los siguientes pilares: internet de las cosas, *big data*, Inteligencia Artificial, sistemas ciberfísicos, ciberseguridad.

- *Internet de las cosas*: es la relación entre las cosas – productos, servicios, lugares, etc. y las personas y procesos hecha posible mediante las tecnologías conectadas a través de diversas plataformas [4].
- *Big data*: Es el manejo de grandes volúmenes de datos de diverso tipo, los cuales permiten la toma de decisiones y la automatización de procesos [4].
- *Inteligencia Artificial*: es el desarrollo de técnicas que permiten a los computadores actuar tal manera que parecen un organismo inteligente [5].
- *Ciberseguridad*: La ciberseguridad, por su parte, consiste en garantizar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información en el Ciberespacio [7]

- *Sistemas ciberfísicos*: es la integración entre procesos físicos , digitales y biológicos [6].
- *Inteligencia de negocios*: es convertir los datos en información y la información en conocimiento para la toma de decisiones en las organizaciones [8].
- *SME*: Pequeñas y medianas empresas (respecto a cantidad de empleados)

3. MÉTODO

La estructura metodológica de la investigación está integrada por una revisión sistemática de literatura para profundizar en el entendimiento del tema de acuerdo al protocolo PRISMA para este tipo de investigación. La revisión sistemática permite identificar la información publicada disponible que le permitirá a los autores describir la calidad de esta evidencia, resumir y comparar las conclusiones, así como discutir las y fortalecerlas [9]. En este caso, el propósito del ejercicio se orientó a la identificación de tendencias investigativas sobre el campo de conocimiento. La Figura 1 sintetiza, las tres fases y las siete etapas que se implementaron para consolidar el estudio.

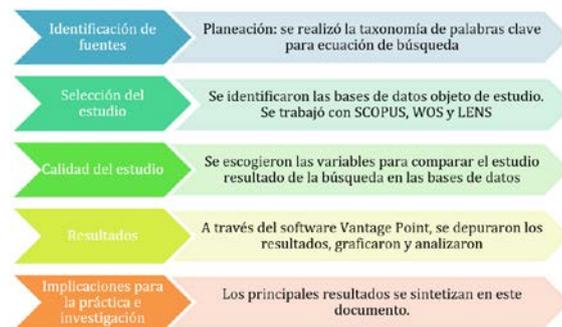


Figura 1. Fases y etapas del estudio de investigación [10]

En esta investigación se utilizó como criterio de exclusión en el proceso de filtrado de los datos obtenidos en la base de datos: el análisis de artículos de revisión y el estudio de documentos que se orientaran a la identificación características específicas asociadas a la Industria 4.0 en las pequeñas y medianas empresas SME su terminología en inglés. El proceso de filtrado se muestra en la Figura 2.

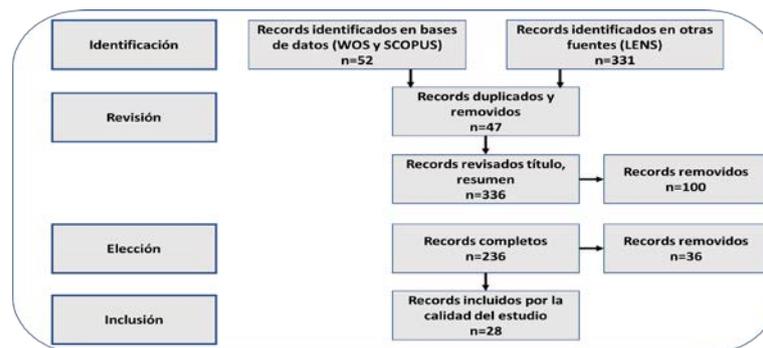


Figura 2. Proceso de selección de artículos para la investigación

Considerando como referente a Kitchenham [11], la metodología de revisión sistemática siguió tres fases:

1. *Planeación*: En esta etapa se estableció un protocolo de búsqueda para realizar la revisión. Se definieron como palabras claves, Industria 4.0, Small and Medium size companies y SME. De acuerdo con las palabras claves, se construyeron las ecuaciones de búsqueda para cada base de datos como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones de búsqueda

Base de datos	Ecuación	Registros
SCOPUS	TITLE-ABS-KEY (("industry 4.0") W/3 (sme))	48
WOS	TEMA: ((industry 4.0) near/3 (sme))	4
LENS	Title: ((industry 4.0) AND SME) OR (Abstract: ((industry 4.0) AND SME) OR (Keyword: ((industry 4.0) AND SME) OR Field of Study: ((industry 4.0) AND SME))))	331

2. *Desarrollo de la revisión*: En esta etapa se establecieron los criterios de revisión, para sustentar teóricamente el estudio, y poder desarrollar un ejercicio de revisión integrando una perspectiva analítica. En este caso, se estableció que los artículos analizados deberían contener información explícita sobre las pequeñas y medianas empresas y campos de desarrollo de la misma en la Industria 4.0. Para evidenciar este criterio de inclusión en los documentos, se analizaron de forma secuencial los apartados título, resumen y palabras clave.

3. *Publicación de resultados*: Los 200 artículos resultantes del proceso de análisis, fueron procesados, se construyeron dos categorías analíticas que permitieron organizar los resultados que se sintetizan en este documento: características específicas de la Industria 4.0 en la SME. La figura 2 representa el proceso de filtrado realizado para esta investigación:

4. RESULTADOS

4.1 Resultados del análisis de tendencias sobre el campo de conocimiento

4.1.1 Dinámica de publicación en el tiempo

La Figura 3 evidencia que la Industria 4.0 en la pequeña y mediana empresa es un tema de interés emergente, tiene una línea de tendencia lineal creciente y su mayor auge se ha generado desde el 2017, a pesar que desde la perspectiva de algunos autores, el concepto fue socializado en Alemania desde el 2011[11]. Al analizar la línea de tiempo se encuentra que el mayor número de publicaciones se desarrollaron en el año 2018, que puede explicarse dado el llamado de la Comunidad Europea para fomentar proyectos que incluyan la inclusión de estas nuevas tecnologías en las pequeñas y medianas empresas.

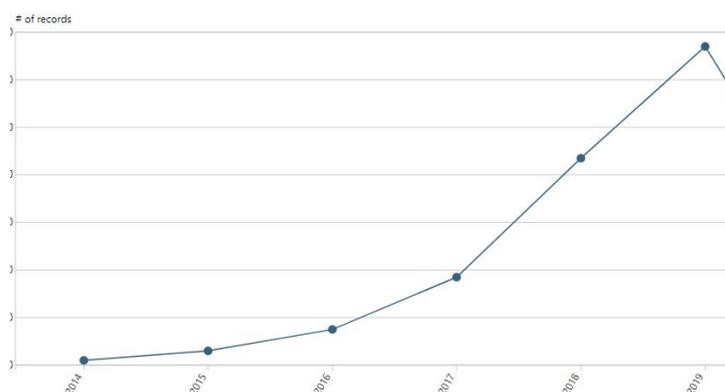


Figura 3. Dinámica de publicación en el tiempo

4.1.2 Dinámica de publicación por país

La Figura 4 representa la dinámica de publicación por países en torno a las temáticas de implementación de la Industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas:

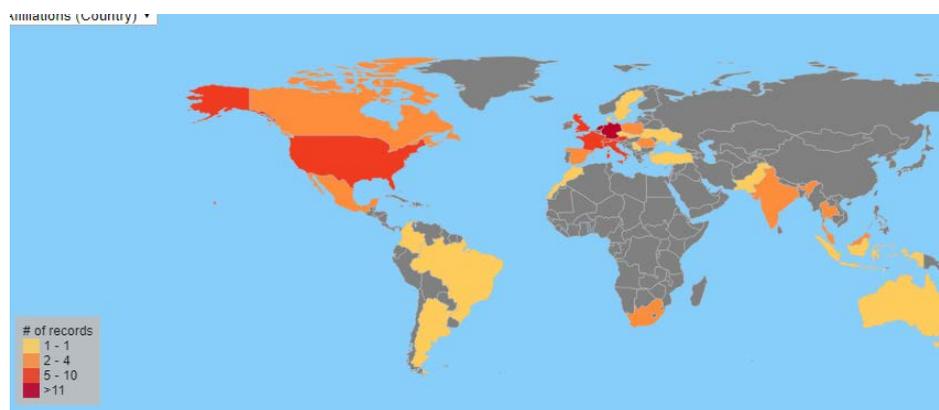


Figura 4. Dinámica de publicación por país

La revisión sistemática de artículos realizada en con las publicaciones científicas de las tres bases de datos analizadas, evidencia que, en el contexto global, los países con mayores publicaciones relacionadas a la incursión de la Industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas son los países del norte de Europa y Estados Unidos, seguidos de Canadá, Méjico, Sudáfrica, India, España y Vietnam. Latinoamérica tiene un nivel de publicación emergente a pesar que dentro de los del grupo son los que más pequeñas y medianas empresas tienen. Según el informe de CEPAL sobre las pequeñas y medianas empresas en América Latina, la carencia de publicaciones al respecto se puede derivar de que la información en los demás países de la región es incompleta, no representativa de un universo empresarial (aunque sea de la economía formal), o posee poca comparabilidad a través de los años debido a cambios metodológicos sucesivos [12]. Por ende, la conformación de sistemas de información empresarial continúa siendo el desafío primario de la mayoría de los países de la región.

A partir del análisis de las palabras clave propuestas por los autores de los artículos seleccionados para este estudio, se construyó la Figura 5. Para la construcción de los mapas, se utilizó como apoyo el software VantagePoint®, que permitió seleccionar las palabras clave con mayor relevancia para el tema de estudio, filtrando aquellas que aparecieran en más de tres artículos. En los mapas, el tamaño de la palabra es directamente proporcional a la cantidad de artículos que la mencionan.



Figura 5. Mapa de relevancia de palabras clave

Al analizar los mapas generados, una tendencia de investigación emergente asociada a la pequeña y mediana empresa relacionada a los retos y necesidades de adaptación de acuerdo a las características especiales de las SME. Desde la perspectiva investigativa se destaca la profundización en temáticas como Industry 4.0 (365 veces mencionada en los artículos), SME (267 veces mencionada en los artículos), Business value (68 veces mencionada en los artículos), Digital Innovation strategies (48 veces mencionada en los artículos), Nuevos retos (57 veces mencionada en los artículos) y Retos (21 veces mencionada en los artículos). Al realizar la limpieza de palabras clave también se encontró una relación entre la investigación alrededor del valor de negocio luego de identificar que la industria 4.0 se podría implementar en pequeñas y medianas empresas y su gran impacto para el crecimiento empresarial.

La Figura 6 relaciona los términos por año de publicación, lo anterior indica que a pesar de que la Cuarta Revolución Industrial tiene sus inicios muchos años atrás, la relación con la pequeña y mediana empresa está ligada a procesos de innovación, aceptación de oportunidades y encaminarse a nuevos retos tecnológicos.



Figura 6. Palabras clave por año de publicación

4.2 Características específicas de la Pequeña y Mediana Empresa con las nuevas tecnologías

El estudio sistemático permitió conceptualizar los clústeres de palabras clave para poder identificar las características específicas de las pequeñas y medianas empresas para identificar los retos de implementar esta nueva tecnología. El proceso llevado a cabo para la agrupación de las palabras fue el análisis sistemático de acuerdo con las variables:

- Procesos de operación
- Procesos de administración
- Impacto
- Innovación digital

Las palabras clave se agruparon de acuerdo a su afinidad al ser evaluadas por estas variables mediante el software VantagePoint y luego se agruparon y analizaron en el software Vosviewer como se representa en la Figura 7. Esto reveló la agrupación de las investigaciones sobre la implementación de la Industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas que se describe a continuación:

- *Necesidades del cliente.* Las pequeñas y medianas empresas deberán analizar los requerimientos específicos de los clientes con el propósito de cumplir con características específicas que las grandes superficies no pueden cumplir

en masa. Como complemento al análisis de grandes cantidades de datos, se suma a la tendencia de la integración del Big Data en la dinámica industrial, el desarrollo de iniciativas que integren la minería de datos, con el fin de establecer metodologías adecuadas para determinar las diferentes posibilidades de toma de decisiones[13].

- *Liderazgo.* Uno de los efectos más evidentes de la Industria 4.0 desde la perspectiva social y al liderazgo de la administración para la adaptación de nuevas líneas de negocio e innovación de productos, lo anterior, con unos grandes retos de empleabilidad en entornos de transformación tecnológica [14]; haciéndose más difícil entender el rol de los empleados en empresas inteligentes. La gestión del cambio entra a jugar un rol fundamental en un entorno cambiante en donde la tecnología está cambiando a la sociedad [15].
- *Creatividad.* Cuando las pequeñas y medianas empresas empiecen a mejorar sus sistemas de liderazgo administrativo para satisfacer los requerimientos específicos del cliente, deberán ser capaces de solucionar de forma creativa las necesidades específicas con los sistemas productivos que manejan [16]. Las estructuras de las pequeñas y medianas empresas deberán generar una cultura innovadora cimentada en la satisfacción de sus clientes internos y externos para el logro de los objetivos corporativos [17]
- *Flexibilidad de procesos.* La adecuación específica a las necesidades del cliente, implica la fácil adaptación de la estructura administrativa de las pequeñas y medianas empresas, además de sus líneas de producción. La Cuarta Revolución Industrial está transformando los sistemas económicos y a su vez, tiende a promover la integración entre el concepto de información y manufactura. Esto lleva a un nuevo concepto disruptivo de control de la industria a nivel mundial en donde busca extender su experticia en toda la cadena de valor [18].
- *Alineación horizontal.* Las pequeñas y medianas empresas presentan retos tecnológicos que implican sistemas de comunicación en tiempo real con sus proveedores y clientes[19]. Este tipo de tecnología, implica estandarizar las iniciativas de acuerdo a los diferentes segmentos del mercado para mejorar las características específicas que demanden los clientes en los diversos contextos industriales [20]. Esta visión de interconexión, busca una estrategia de transformación en las industrias de manufactura, para la generación de conexiones entre máquinas y el desarrollo de procesos de sincronía entre oferta y demanda en tiempo real [21].

Dentro de las herramientas de innovación digital que se encontraron en la revisión de la literatura para poder tomar decisiones en tiempo real están: La computación en la nube, está en proceso de revolución de la industria de tecnología [22]. El Internet de las cosas (IOT) y Big Data. Tener la información en tiempo real, les permite a las organizaciones monitorear tareas y procesos complejos para poder mejorar rendimientos en su operación[23]

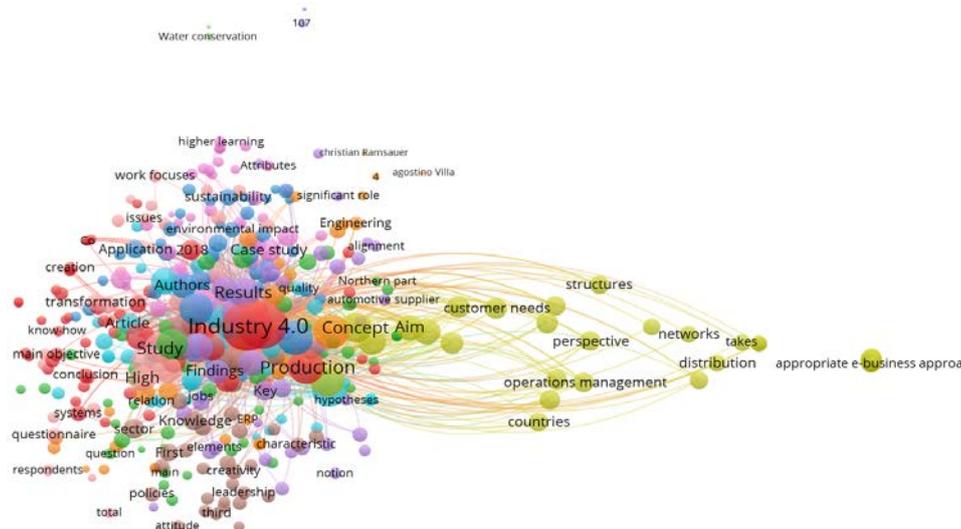


Figura 7. Relación de palabras clave

4.3 Resultados de la revisión sistemática de la literatura sobre el campo de conocimiento

La revisión sistemática de las publicaciones científicas sobre las pequeñas y medianas empresas, refleja que este grupo de organizaciones tienen poca capacidad de apalancamiento, baja experiencia en procesos productivos y falta de capacitación especializada de sus equipos de trabajo. Por lo anterior, se hace un llamado general conceptual a lo largo de los escritos, a la intervención de entidades gubernamentales para dar soporte en conocimiento y desarrollo de habilidades efectivas para su desarrollo [24].

La investigación académica para conceptualizar la Industria 4.0 se enfoca principalmente en las grandes empresas, lo anterior, deja rezagados los esfuerzos para innovar estrategias de implementación a bajo costo enfocadas a la

pequeña y mediana empresa. Algunas grandes empresas tienen como proveedores a pequeñas y medianas, por lo anterior, uno de los grandes retos son la implementación de desarrollos tecnológicos que impliquen la amparar las pequeñas y medianas empresas dentro de las estrategias de negocio a gran escala de las grandes [25]

A nivel mundial, la Unión Europea está realizando grandes esfuerzos para generar proyectos de implantación de la Cuarta revolución en pequeñas y medianas empresas. Se ha trabajado en proyectos con incentivo económico para el desarrollo de habilidades específicas, capacitación o implementación de tecnologías. A diferencia de lo que ocurre en la UE, en América Latina no hay un acuerdo sobre la definición para el crecimiento de las pequeñas y medianas empresas. Dadas la ausencia de iniciativas comunes y de una real integración económica, por un lado, y la existencia de contextos nacionales, económicos y productivos, muy heterogéneos, por el otro, no hay evidencia de un soporte tecnológico que incentive el desarrollo de las pequeñas y medianas empresas [3].

Al mismo tiempo, en la mayoría de los países no hay un registro sistemático de las principales variables que permiten analizar y monitorear las características y el desempeño de las empresas. En algunos casos no existe una definición nacional y se utiliza la de una institución internacional. También puede ocurrir que en el mismo país coexistan varias definiciones de pequeñas y medianas empresas, tradicionalmente una basada en la cantidad de empleados y utilizada por los institutos de estadística y otra que sigue los criterios (ventas, activos, etc.) de las instituciones de fomento a las empresas.

En ese orden de ideas, la revisión de la literatura permite inferir que para que las organizaciones de pequeña y mediana escala implementen la Industria en su propia cultura organizacional, deberán visualizar nuevas oportunidades diversificación de sus líneas de negocios implantando tecnologías de innovación digital, toma decisiones en tiempo real y almacenamiento de datos que permitan satisfacer las necesidades del cliente [26]. El éxito de las compañías depende de la capacidad de adaptación a las necesidades del mercado, el consumidor y a su vez de la capacidad de adaptación tecnológica al cambio global [27].

4.3.1 Prácticas de referencia de la Industria 4.0 para las Pequeñas y Medianas Empresas

La industria a nivel mundial ha mostrado el interés la implementación de nuevas tecnologías en sus diferentes procesos productivos, en las empresas a gran escala, por esta razón es primordial evidenciar algunas prácticas asociadas a la Cuarta revolución enfocadas en la pequeña y mediana empresa. Las prácticas analizadas en torno a la implementación de las tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial en la pequeña y mediana empresa son:

1. Para el logro de los objetivos corporativos las pequeñas y medianas empresas deben reflejar niveles de experiencia, resultados del desarrollo de habilidades específicas, capacitaciones y alineados a la estrategia empresarial. En ese orden de ideas la implementación de productos y servicios interconectados entre sí que permitan el monitoreo de las necesidades del cliente, sistemas productivos y monitoreo de las actividades empresariales permitirá mejorar los procesos de gestión.
2. Constante interacción con las sistemas de demanda permitirán la optimización de los procesos y aumentar la autonomía de los procesos de producción [28].
3. Los estudios revelan que, al incrementar la implementación de tecnologías digitales innovadoras, incrementa la eficiencia en la gestión de las operaciones logísticas de la cadena de suministro, lo anterior permitirá mejorar los tiempos de espera y respuesta de la materia prima para poder cumplir plazos establecidos y pactados con los clientes [29].
4. Las pequeñas y medianas empresas que se encuentran asociadas a empresas con mayor escala en número de empleados y poder adquisitivo, podrán articular los procesos tecnológicos amparados en la articulación de necesidades comunes para el crecimiento conjunto. Lo anterior implementando tecnologías como Big Data [12].
5. Generar un mayor valor para el cliente [30]. El diseño del producto es clave para identificar las etapas del proceso que se pueden mejorar, decisiones en tiempo real e interconectividad de todas las etapas de desarrollo.
6. Empleabilidad, la Cuarta revolución no solo afecta los sistemas de manufactura, sino que tiene un impacto significativo en la empleabilidad en el futuro [31]. Todos los cambios del contexto afectan la posición de los futuros cargos y funciones del ser humano como eje fundamental de la sociedad.

Todas estas prácticas antes descritas tienen un común denominador y es la interconexión de los sistemas de negocio, objetos y equipos, en tiempo real para la toma de decisiones [32]. La clave de pequeñas y medianas empresas en un contexto 4.0 está en la capacidad de tomar capacitar a su equipo en habilidades especiales y tecnológicas para la toma de decisiones en tiempo real y así reducir tiempos y costos.

Esto conlleva a la necesidad de que las organizaciones realicen inversiones estratégicas en tecnología de acuerdo con el comportamiento del consumidor y de acuerdo con el ciclo de vida de los productos y/o servicios generados [33]. Donde se evidencia que, con los avances en la conectividad tecnológica, la comunicación, el desarrollo de tecnologías

emergentes, el internet de las cosas, y la conexión entre objetos inteligentes, la Cuarta Revolución Industrial busca generar un impacto significativo para el desarrollo y generación de sistemas integrados que se sincronicen en el tiempo real, articulados con los objetos físicos y el ciberespacio [34].

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La revisión muestra que, la investigación y aplicación de pilares de la Cuarta Revolución Industrial se da muchos más en la gran empresa que en las pequeñas y medianas; no obstante, se encuentra que hay pilares de la Cuarta Revolución Industriales menos costosos que en las revoluciones anteriores, como es el caso de la computación en la nube. Esto sugiere que, la falta de aplicación en las SME no necesariamente corresponde a falta de recursos, sino, principalmente al desconocimiento de estas tecnologías, su impacto en los procesos de negocio por parte de las SME y a la resistencia al cambio por parte de esta empresa. La Figura 8 representa las áreas de investigación encontradas como resultado de la revisión para implementar la Industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas. Si bien las dimensiones de los procesos de negocio aumentan con el tamaño de la empresa, su esencia es la misma, por tanto, tecnologías aplicables a las grandes empresas son pertinentes para la pequeña empresa. Teniendo en cuenta esta condición se proponen la siguiente ruta de áreas a investigar para aprovechar las oportunidades y superar los retos de la industria 4.0 por parte de las SME.



Figura 8. Áreas de investigación para la aplicación de la industria 4.0 en SME

6. CONCLUSIONES

El mundo está experimentando cambios importantes en los ámbitos geopolítico, económico y tecnológico, que afectan las posibilidades de crecimiento de la región y, al mismo tiempo, generan nuevos espacios que pueden ser aprovechados en el foco de esta revisión. La falta de inversión tecnológica en las pequeñas y medianas empresas puede generar un impacto colateral en el crecimiento de una región, por lo anterior, es importante la creación de mesas de negociación y diálogo entre Universidades y empresas para potenciar las habilidades técnicas necesarias a un costo razonable hacia el objetivo corporativo y desarrollo sostenible conjunto.

Las pequeñas y medianas empresas, son un componente fundamental del tejido empresarial en América Latina. Esta importancia se manifiesta en varias dimensiones, como su participación en el número total de empresas, cultura social, quehacer institucional o la creación de empleo. Esto lleva a considerar la inserción de las pequeñas y medianas empresas en la estructura productiva de los países de la región, en los proyectos de inversión a largo plazo y en los incentivos de desarrollo regional. A pesar de los retos competitivos, los propietarios y gerentes de negocios deben enfocar sus esfuerzos de liderazgo hacia la flexibilización de procesos y capacitación de los empleados hacia la era de innovación digital de la mano con la academia para generar un impacto de mayor envergadura.

La Industria 4.0 en gran medida, está abarcada por compañías con poder adquisitivo mayor y músculos financieros que soportan los altibajos de la economía y la demanda. Lo anterior se direcciona a través de la conexión entre necesidades y productos finales, esta articulación permite la implementación de tecnologías, estar ligado a la creación de valor a través de la capacitación del personal apto para la adopción de las mismas y del crecimiento exponencial mediante el cumplimiento específico de las necesidades del cliente. Lo anterior, implica grandes inversiones que se pueden recuperar a largo plazo y que la estructura de las grandes compañías lo permiten soportar. La característica principal de la pequeña y mediana empresas, es su débil músculo financiero, por lo anterior, es necesaria la inversión en tecnología adecuada y la capacitación del personal encargado de la misma, reconociendo que, sin una adecuada recopilación de datos, no es posible una manufactura inteligente, ni la toma de decisiones en tiempo real. Es un proceso cultural que lleva inversión en tiempo y en desarrollo de nuevo conocimiento y capacidades en el largo plazo. Lo anterior, apoyado de desarrollo abiertos y de la constante actualización de la industria y con adecuadas políticas financieras y públicas para el desarrollo adecuado.

Las características específicas de la Cuarta Revolución Industrial en pequeñas y medianas empresas proponen una adopción de la interconectividad de la producción, mediante la adopción de paquetes tecnológicos asequibles y a

menor costo; con el fin de optimizar procesos, recursos y tiempos. Esta línea emergente de interés mundial, ha incrementado en los últimos años debido al crecimiento en las demandas, necesidades y exigencias del mercado. Para muchas empresas de primer mundo, han sido el foco estratégico de la agenda de investigaciones. La mayor parte de las publicaciones analizadas se encuentran en Estados Unidos y Europa, sin embargo, muchas de las tecnologías creadas en la Cuarta revolución, no se han estudiado con suficiente rigurosidad en Latinoamérica. Por lo cual se hacen necesarios estudios de gestión del cambio, adaptabilidad de procesos y prospectivas de negocio a menor escala.

REFERENCIAS

- [1] Govindarajan, U. y Trappey, A. (2018). Immersive Technology for Human-Centric Cyberphysical Systems in Complex Manufacturing Processes: A Comprehensive Overview of the Global Patent Profile Using Collective Intelligence. *Complexity*, 2018, 1–17.
- [2] Frank, A. et al. (2019). Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, 141, 341–351.
- [3] Dini, M. y Stumpo, G. (2018). Mipymes en América Latina: un frágil desempeño y nuevos desafíos para las políticas de fomento. *Documentos de Proyectos (LC/TS.2018/75)*.
- [4] Schwab, K. (2016). The fourth industrial revolution. *World Economic Forum*.
- [5] Raynor, W. (1999). The international dictionary of artificial intelligence. *Glenlake pub*.
- [6] Laka, J. (2015). *Industria 4.0*. DYNA, 16, 56-67.
- [7] Sutton, D. (2015). *Cibersecurity a practitioner’s guide*. BCS Learn. Dev. Ltd.
- [8] Loshin, D. (2012). *Business intelligence: The savvy manager’s guide*. Manag. Guid.
- [9] Liberati, A. et al. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration. *BMJ*, 339, 162-175.
- [10] Linares, E. et al. (2018). Methodology of a systematic review. *Actas Urológicas Españolas*, 42(8), 499–506.
- [11] World Economic Forum. (2019). Globalization 4.0 shaping a new global architecture in the age of the Fourth Industrial Revolution. Recuperado: <https://www.weforum.org/whitepapers/globalization-4-0-shaping-a-new-global-architecture-in-the-age-of-the-fourth-industrial-revolution>.
- [12] Matt, D. y Rauch, E. (2020). *Industry 4.0 for SMEs Challenges. Opportunities and Requirements*.
- [13] Gampfer, F. et al. (2018). Past, current and future trends in enterprise architecture—A view beyond the horizon, *Computers in Industry*, 90, 70–84.
- [14] Lamnabhi, F. et al. (2017). Systems & Control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges. *Annual Reviews in Control*, 43, 1–64.
- [15] Kerschner, C. et al. (2018). Degrowth and Technology: Towards feasible, viable, appropriate and convivial imaginaries. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1619–1636.
- [16] Schlegel, A., Langer, T. y Putz, M. (2017). Developing and Harnessing the Potential of SMEs for Eco-Efficient Flexible Production. *Procedia Manuf.*, 9, 41–48.
- [17] Ravina, R. et al. (2019). Happiness Management en la época de la Industria 4.0. *Retos*, 9(18), 189–202.
- [18] Ciffolilli, A. y Muscio, A. (2018). Industry 4.0: National and regional comparative advantages in key enabling technologies. *Eur. Plan. Stud.*, 26(12), 2323–2343.
- [19] Grube, D., Malik, A. y Bilberg, A. (2019). SMEs can touch Industry 4.0 in the Smart Learning Factory. *Procedia Manuf.*, 31, 219–224.
- [20] Montori, F. et al. (2018). Machine-to-machine wireless communication technologies for the Internet of Things: Taxonomy, comparison and open issues. *Pervasive Mob. Comput.*, 50, 56–81.
- [21] Kharb, S. y Singhrova, A. (2019). A survey on network formation and scheduling algorithms for time slotted channel hopping in industrial networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 126, 59–87.
- [22] Pedone, G. y Mezgár, I. (2018). Model similarity evidence and interoperability affinity in cloud-ready Industry 4.0 technologies. *Computers in Industry*, 100, 278–286.
- [23] Rendall, R., Chiang, L. y Reis, M. (2019). Data-driven methods for batch data analysis – A critical overview and mapping on the complexity scale. *Computers and Chemical Engineering*, 56, 1–13.
- [24] Faller, C. y Feldmüller, D. (2015). Industry 4.0 learning factory for regional SMEs. *Procedia CIRP*, 32, 88–91.
- [25] Müller, J., Buliga, O. y Voigt, K. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technol. Forecast. Soc. Change*, 132, 2–17.
- [26] Gross, H. (2008). Lungenversagen: Optimale beatmung dank druckmessung im ösophagus? *Dtsch. Medizinische Wochenschrift*, 133(50), 2601-2617.
- [27] Gorecky, D., Khamis, M. y Mura, K. (2017). Introduction and establishment of virtual training in the factory of the future. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, 30(1), 182–190.
- [28] Moeuf, A. et al. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *Int. J. Prod. Res.*, 56(3), 1118–1136.
- [29] Sommer, L. (2018). Industrial revolution - Industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution? *J. Ind. Eng. Manag.*, 8(5), 1512–1532.
- [30] Ardito, L. et al. (2019). Towards Industry 4.0. *Bus. Process Manag. J.*, 25(2), 323–346.
- [31] Mendoza, M. y Serrano, L. (2019). Análisis tendencias 4.0. *Omega*.
- [32] Barata, J. et al. (2018) Mobile supply chain management in the Industry 4.0 era: An annotated bibliography and guide for future research. *J. Enterp. Inf. Manag.*, 31(1), 173–192.
- [33] Bortolini, M., Galizia, F. y Mora, C. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend. *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 93–106.
- [34] Aristodemou, L. y Tietze, F. (2018). The state-of-the-art on Intellectual Property Analytics (IPA): A literature review on artificial intelligence, machine learning and deep learning methods for analysing intellectual property (IP) data. *World Patent Information*, 55, 37–51.

Utilización del método Agente Viajero Múltiple MTSP como modelo para construir o planificar rutas de entrega de alimentos

Denicce Licht Ardila
Ana Lucía Paque Salazar
Jorge Bernardo Ramírez Zarta
Corporación Universitaria del Huila
Colombia

Estudios afirman que las ciudades intermedias en Colombia han tenido un rápido crecimiento poblacional, que constituye retos para los gobernantes puesto que, deben garantizar la calidad de vida de sus habitantes, en variables como aprovisionamiento, educación y salud. La logística urbana, se ha enfocado en aportar metodologías sencillas que permitan a las ciudades movilizar carga, personas y dinero, y de esta manera aportar al desarrollo metropolitano. Para el caso de Neiva, se pretende entregar metodologías que permitan a los generadores de carga del centro de acopio del sur (Surabastos) responder ante sus clientes en el abastecimiento. El propósito de esta investigación es analizar el estado actual de la distribución del tubérculo papa, hacia los comercializadores en la ciudad; clasificados como fruver, y poder plantear un algoritmo que permita tomar decisiones a los generados cuando se realice la distribución del alimento. La investigación tiene un enfoque cuantitativo, no experimental, de diseño transversal de tipo aplicado, y se siguieron 3 etapas: la primera consistió en el acercamiento al contexto geográfico, determinación de los actores y el diseño de los instrumentos de recolección de información. La etapa 2, se denominada trabajo de campo, se hizo la recopilación, análisis de información secundaria y reconocimiento contextual, la etapa 3, se dio con el modelamiento de la información en los métodos seleccionados; finalmente, al realizar el análisis de los modelos; teniendo en cuenta aspectos de infraestructura, modos, entre otros, se concluye que la planificación de las rutas mejoradas; en relación con distancia y tiempo es precisa hacerla por medio del método Agente Viajero Múltiple (MTSP). Cabe resaltar que los métodos MTSP, Heurística Fisher y Jaiiumar, y TSP no se pueden descartar, sino que son modelos que se pueden utilizar de acuerdo a los objetivos o estrategias que quieran alcanzar, o, deseen implementar los generadores de carga.

1. INTRODUCCIÓN

Neiva, catalogada como una ciudad intermedia, dado que depende del comercio y es punto estratégico para el intercambio de flujos hacia el sur del país, en abastecimiento y comercialización cuenta con un centro de acopio más grande del sur del país (Surabastos) donde llegan productos perecederos y no perecederos de diferentes departamentos del país, para el caso del producto de la investigación, a Surabastos llega principalmente de departamentos de Boyacá y Nariño, lo que es distribuido en la ciudad y en los municipio vecinos.

Con base en el observador económico y financiero [8], la papa es un alimento de gran importancia en la canasta familiar ya que presenta un alto consumo, por ello los comercializadores y transportadores deben tener especial cuidado para que puedan entregar un alimento en buenas condiciones al consumidor final y con ello, los generadores de carga logren minimizar costos y tiempos en transporte.

Para el proyecto de investigación se hizo énfasis en la papa, pues es el producto que diariamente tiene mayor rotación en el centro de acopio, a su vez, teniendo en cuenta que el tiempo de conservación del alimento es de cinco a ocho días. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue elaborar un modelo de distribución urbana que permita describir las mejores rutas de distribución del alimento, mediante los métodos agente viajero múltiple (MTSP) Heurística Fisher y Jaiiumar, y TSP teniendo en cuenta variables como costos tiempo, congestión de tráfico, consumo de combustible entre otras.

Por lo anterior, el presente documento presenta en primer lugar un acercamiento al contexto geográfico, para la determinación de los actores y el diseño de los instrumentos de recolección de información, así como su análisis y reconocimiento contextual, para poder entregar un modelo que responda a las expectativas de los generadores de poder entregar un producto con todas sus propiedades nutricionales, fresco y disponible. Y que esto se puede dar por medio del método agente viajero múltiple (MTSP). Que, a su vez, de acuerdo con los objetivos corporativos de los generadores los métodos MTSP, Heurística Fisher y Jaiiumar, y TSP son modelos que les permitirá a los generadores tener altos tiempos de respuesta. Por último, en la metodología se describen las variables utilizadas y la especificación de los métodos propuestos. Seguido, se analizan los resultados de cada uno de los métodos para lograr construir las conclusiones.

2. MÉTODO

La distribución urbana de tubérculos en la ciudad de Neiva cumple un papel importante para los generadores (Surabastos), puesto que, la razón de ser de cada una de las bodegas generadoras es poder abastecer de manera oportuna a los receptores del tubérculo (Fruver, tiendas minoristas y mayoristas) en la cadena de suministro. Que, si éste concepto lo llevamos a la literatura es semejante a la definición planteada por varios autores, como Rushton, Croucher y Baker [3], quienes establecen que la logística *es una transferencia eficiente de bienes desde la fuente de suministro, pasando por los puntos de manufactura, hasta los lugares de consumo final, al menor costo y con el mejor nivel servicio al cliente posible*. A su vez, se enlaza con la dada por The Center of Excellence for Sustainable Urban

Freight Systems [5], que describe como el posicionamiento de recursos en el momento correcto, en el lugar correcto, al costo correcto, y en las cantidades correctas.

Teniendo en cuenta el grado de nulidad respecto a la implementación de la logística urbana en la ciudad, para los generadores no es posible tener el producto en el momento correcto; puesto que existen variables que afectan la distribución en la ciudad. Por ello lo que se pretende con esta investigación es, poder entregar un modelo que tenga las características de las definiciones planteadas y a su vez la descrita por Taniguchi; definiendo logística de la ciudad, proceso usado para la optimización completa de las actividades de logística y transporte de las empresas en zonas urbanas, teniendo en cuenta variables como la congestión de tráfico, consumo de combustible entre otros [2].

Las actividades logísticas asociadas a los generadores y transportadores del tubérculo, tienen su inicio en Surabastos, centro de acopio más grande del sur del país, que recepciona productos de diferentes lugares de Colombia, y desde allí, es distribuido a diferentes puntos dentro y fuera de la ciudad, que para este caso en particular, las actividades terminan en los puntos de distribución final como supermercados, Fruver, minoristas, mayoristas, la integración de las actividades principales del negocio a través de proveedores, dan valor agregado a clientes y consumidor final.

La planificación de rutas es una actividad importante en la cadena de abastecimiento, puesto que, mejora la distribución de los productos en relación con la distancia recorrida y tiempo de entrega, entendiéndose este como el que dura el recorrido del transporte y las actividades de cargue y descargue en el punto destino [1]. Para la planificación de las rutas existen varios métodos, modelos matemáticos que generando algoritmos permiten hallar rutas que optimicen distancia, tiempos, disminuya costos, y otras variables que afecten este proceso, que permitan poder llevar el tubérculo desde el punto de inicio hasta el punto final satisfaciendo el cliente o consumidor final.

Para la investigación se evaluaron varios modelos y dadas las características propias del mismo, y, a su vez porque contemplan las mismas variables analizadas en la investigación; se tuvo en cuenta el modelo de MTSP, (Multiple Traveling Salesman Problem), Heurística de asignación generalizada de Fisher y Jaiiumar, Modelo TSP, y el modelo de Traveling Salesman Problema. Estos modelos han sido estudiados por varios investigadores en el área de investigación de operaciones con enfoque de programación de algoritmos. Olivera, A.; [10] describe los modelos MTSP, como aquel que dispone de un depósito y un número (n) de vehículos donde se debe establecer para cada uno, un modelo de ruta de tal forma que los clientes sean visitados una sola vez por un solo vehículo en su establecimiento. El método Heurística de asignación generalizada de Fisher y Jaiiumar [6] permite crear clúster donde principalmente se deben identificar el número de clientes que se encuentren ubicados geográficamente cerca, que son asignados en cada clúster teniendo en cuenta no sobrepasar la capacidad del vehículo; de tal forma se determina la ruta, y se consigue visitar cada cliente una sola vez, logrando que la distancia recorrida sea mínima.

El modelo TSP, Traveling Salesman Problem, según lo expone Olivera, A. [10], *es un modelo de ruta donde se dispone de un solo vehículo, determinando las posibles rutas a seguir para visitar cada cliente una sola vez teniendo en cuenta variables como, la distancia, tiempo y costo mínimo; de tal forma que inicie y termine el recorrido en el mismo punto de partida*, que, para la investigación es el centro de acopio del sur del país (Surabastos).

2.1 Metodología y procedimiento

Para la presente investigación se definió un planteamiento metodológico de tipo aplicado, no experimental de diseño transversal y enfoque cuantitativo. Respecto a fuentes secundarias se encuentran documentos como las coyunturas económicas de Neiva, apuestas económicas, la agenda interna de productividad y competitividad del Huila, el plan de desarrollo 2016-2019, plan municipal de competitividad, los indicadores económicos, el plan de ordenamiento territorial, el plan maestro de movilidad y el plan nacional de desarrollo donde se tienen en cuenta aspectos específicos sobre la ciudad de Neiva; de entidades como la Cámara de comercio, la Gobernación del Huila, la Alcaldía de Neiva, Sistema estratégico de transporte público, el DANE y el Departamento Nacional de planeación. Toda esta información recolectada nos permite tener una perspectiva global de las actividades económicas de la ciudad; el comportamiento de los entes gubernamentales hacia las practicas logísticas; las proyecciones de la ciudad con respecto a su población e infraestructura, entre otros.

Así mismo la población objetivo tiene en cuenta todos los actores que directa o indirectamente están involucrados en las prácticas logísticas dentro de la cadena de abastecimiento de alimentos seleccionada; actores directos son aquellos eslabones principales de la cadena de suministro, entre los que están, los generadores (centros de acopio, Surabastos), receptores (fruver y establecimientos de mercado) y transportadores. Y los actores indirectos, son los que intervienen de manera indirecta en la práctica logística como lo son los entes gubernamentales, gremios y centrales mayoristas. El procedimiento para determinar la Muestra se realiza por Muestreo no Probabilístico por conveniencia-discrecional; con un tamaño de muestra estratificado con el 95% de confianza y un 7% de error de muestreo.

Para el desarrollo de la investigación se siguieron tres etapas que estructuran la metodología a seguir; etapa 1, Acercamiento al contexto geográfico, selección de fuentes primarias y secundarias, determinación de los actores y el

diseño de los instrumentos de recolección de información primaria, como herramientas, formatos y procedimientos que permitieron la recolección de información primaria y secundaria. La etapa 2, se denomina trabajo de campo, donde se hizo la recopilación, análisis de información secundaria y reconocimiento contextual, seguido la simulación de la información; finalmente realizar el análisis de los antecedentes normativos y estudios previos para la incluir en la modelación, los sistemas actuales de distribución urbana de cadenas de alimentos, teniendo en cuenta aspectos de infraestructura, modos, medios y referentes normativos y finalmente poder obtener la planificación de las rutas mejoradas en relación con distancia y tiempo.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Luego de hacer un comparativo de los modelos matemáticos descritos en apartados anteriores, estos permitieron evaluar cada una de las posibles rutas que se pueden generar para el abastecimiento de papa en cada uno de los establecimientos, teniendo en cuenta principalmente las variables tiempo y distancia, que fueron analizadas en el trabajo de campo. Así, los modelo que a juicio de los autores dieron el mejor resultado en la función objetivo, es el modelo de MTSP, Heurística de asignación generalizada de Fisher y Jaiumar, y Traveling Salesman Problem, sabiendo que, para poder generar las rutas, la primera restricción que se tomó es la identificación de los días de abastecimiento, determinando 3 días, Lunes, Miércoles y Viernes, con la condicionante que, los dos primeros días contaran con una misma demanda y el último día contara con un aumento del 10% de la demanda con respecto a los anteriores. En la Tabla 1 se muestra la demanda semanal reportada por los receptores del alimento. Los nombres de los establecimientos se designarán con la letra E, enumerados en orden cronológico.

Tabla 1. Demanda semanal por establecimiento

Establecimiento	Lun y Mie (ton)	Vie (ton)	Semana (ton)	Personal	Tiempo descarga (min)
E1	1.05	1.04	3.5	2	30
E2	0.45	0.6	1.5	1.0	10
E3	0.6	0.8	2	1.0	15
E4	0	0.09	0.09	1	3
E5	2.4	3.2	8	4	40
E6	0.75	1.0	2.5	2	15
E7	0.15	0.2	0.5	2	15
E8	0.085	0.113	0.283	1	7
E9	0.9	1.2	3	3	30
E10	1.2	1.6	4	2	30
E11	0.3	0.45	1	1	5
E12	1.8	2.4	6	2	20
E13	0.18	0.24	0.6	1	5
E14	0	0.75	0.75	2	15
E15	2.31	3.08	7.7	6	30
E16	2.31	3.08	7.7	6	30
E17	10.667	10.667	32	4	40
E18	0	10	10	5	60
E19	0.45	0.6	1.5	2	10
E20	0.9	1.2	3	2	10
E21	2.1	2.8	7	3	20
E22	0.9	1.2	3	2	15
E24	0	7	7	3	120
E25	0.9	1.2	3	3	15
E26	0.15	0.2	0.5	2	10
E27	0.3	0.4	1	2	15
E28	0	3	3	3	20
E29	0.3	0.4	1	2	10
E30	0.9	1.2	3	3	15
E31	0.3	0.4	1	1	15
E32	0	1.05	1.05	2	15
E33	0.6	0.8	2	1	10
E34	4.8	6.4	16	3	15
E35	4.8	6.4	16	3	15
E36	4.8	6.4	16	3	15
E37	1.8	6.4	16	3	15
E38	1.8	6.4	16	3	15
E39	6	8	20	3	40
E40	0	8	8	3	45
E41	0.2	0.266	0.666	2	5
E42	3	4	10	2	15
E43	0	1	1	2	15
E44	0.54	0.72	1.8	2	10

Con la información de la Tabla 1, se procede a hacer uso en cada uno de los modelos; en primera instancia se utiliza MTSP, realizando clúster de acuerdo a la ubicación geográfica del cliente, una vez ruteados los establecimientos por zonas se determinó la ruta a seguir para visitar cada establecimiento una sola vez y regresar, de tal manera que la distancia total recorrida sea mínima; en la Tabla 2 se describe la formulación del algoritmo utilizado.

Tabla 2. Algoritmo MTSP

Índices	
I	Nodos de origen
J	Nodos destino
Variables	
U_i	Etapa en la que se visita el nodo i
X_{ij}	variable binaria que activa el arco desde i a j si es 1 o lo desactiva si es 0
Parámetros	
D_{ij}	Distancia entre el nodo i al nodo j

La ecuación (1) denominada como función Objetivo, busca minimizar los costos totales asociados a realizar el viaje.

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n D_{ij} * X_{ij} \quad i \neq j \quad (1)$$

En la ecuación (2), se muestran las restricciones de entradas del nodo i, que permite determinar la cantidad de camiones que salen del punto de origen.

$$\sum_{j=0}^n X_{0j} = m \quad (2)$$

De la misma forma, en la ecuación (3) se describe la restricción de entrada del nodo j; esta se usa para garantizar que el camión sale de cada establecimiento una sola vez.

$$\sum_{j=0}^n X_{ij} = 1 \quad \forall i, i \neq j \quad (3)$$

De modo idéntico se realiza la restricción de salidas al nodo j; con el fin de garantizar que llega a cada destino una sola vez, la ecuación (4) muestra dicha condición.

$$\sum_{i=0}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j, i \neq j \quad (4)$$

De la misma manera se describe en la ecuación (5) la restricción de eliminación de sub-tours, es decir, asegurar que no se creen rutas que no están conectadas entre sí.

$$u_i - u_j + (n - 1)X_{ij} \leq n - 2 \quad \forall (i, j), i \neq 0, j \neq 0, i \neq j \quad (5)$$

$$0 \leq X_{ij} \leq 1, u_i \geq 0$$

Dado que el modelo original normalmente crea una ruta grande y varias rutas pequeñas; y que, por las características del trabajo de campo, de no contar con demandas y capacidades, se determinó usar un algoritmo complementario para ejecutar el MTSP de manera que, la ruta grande no sobrepase la capacidad de los camiones, y a medida que se rutean unos establecimientos, se *eliminan* de la lista, para volver a ejecutar el MTSP, y este proceso se repite hasta que todos los establecimientos sean ruteados. La Tabla 3 muestra el resultado del modelo para los días lunes y miércoles. Para la interpretación de los datos el centro de acopio (surabastos) será nombrado como N1, los establecimientos como en la Tabla 1.

Tabla 3. Resultados del Modelo MTSP. Lunes y miércoles

N1	E17	N1												
N1	E34	E38	E30	N1										
N1	E3	E33	E6	E21	E31	E8	E1	E13	E10	N1				
N1	E44	E2	E22	E25	E27	E23	E7	E26	E5	E11	E36	E19	N1	
N1	E37	E41	E16	E20	E29	N1								
N1	E4	E39	N1											
N1	E9	E12	E35	N1										
N1	E42	N1												

En la Tabla 4 se muestran los resultados de la aplicación del modelo para el día viernes.

Tabla 4. Descripción de la ruta para el día viernes

N1	E17	N1												
N1	E18	N1												
N1	E39	E1	E11	N1										
N1	E31	E15	E9	E14	E24	N1								
N1	E40	N1												
N1	E38	E30	N1											
N1	E27	E33	E3	E7	E21	E20	329	E41	E16	N1				

N1	E37	E28	E43	N1								
N1	E8	E4	E34	E23	N1							
N1	E35	N1										
N1	E36	N1										
N1	E44	E2	E22	E25	E32	E26	E6	E12	E5	N19	N1	
N1	E10	E13	E42	N1								

Por lo anterior, con las rutas generadas se realiza el análisis de recorrido en distancia y tiempo, teniendo en cuenta el tiempo de cargue y descargue en cada establecimiento, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Distancia y tiempo de las rutas

Ruta	Lunes y miércoles		Viernes	
	Distancia (km)	Tiempo (min)	Distancia (km)	Tiempo (min)
Ruta 1	7.1	55.2	7.1	55.2
Ruta 2	18.55	83.33	15.7	91
Ruta 3	27.29	211.33	24.3	121
Ruta 4	17.47	191	22.69	233
Ruta 5	9.8	98.5	18.85	68
Ruta 6	9.8	98.5	18.85	68
Ruta 7	8.8	86.67	18.19	177.3
Ruta 8	5.4	26.67	12.7	79.33
Ruta 9			20.45	79.33
Ruta 10			7	30
Ruta 11			10.3	34.67
Ruta 12			15.87	196
Ruta 13			7.6	83.67
Total	110.16	863.7	193.95	1321.5

Por otra parte, se aplica el modelo heurístico de asignación generalizada de Fisher y Jaiumar [6], para hallar otras rutas, el modelo hace referencia en generar grupos resolviendo un problema de asignación generalizada (GAP) [7] sobre los establecimientos. Para obtener los resultados bajo el modelo se desarrolla el algoritmo:

Paso 1 (inicialización). Formar K clúster e inicializar cada uno con un cliente s_k ($k = 1, \dots, K$).

Paso 2 (asignación). Resolver el Problema de Asignación Generalizada

Paso 3 (ruteo). Para cada clúster, resolver un TSP con sus clientes.

Con la aplicación de estos tenemos los resultados de las rutas que se describen en la Tabla 6.

Tabla 6. Descripción de las rutas lunes y miércoles

N1	E1	E29	E7	E10	E13	E20	E21	E26	E6	N1
N1	E2	E8	E3	E5	E12	E16	E9	E14	E11	N1
N1	E17	N1								
N1	E19	E36	E35	N1						
N1	E22	E25	E42	E44	E27	E33	E23	N1		
N1	E30	E34	E38	N1						
N1	E31	E37	E41	N1						
N1	E39	N1								

Así mismo, en la Tabla 7 se presentan los resultados para el día viernes.

Tabla 7. Descripción de las rutas día viernes

N1	E1	E29	E7	E24	E10	N1				
N1	E2	E13	E6	E8	E3	E4	E5	E12	N1	
N1	E39	E15	E21	E20	E31	E16	E14	E11	N1	
N1	E17	N1								
N1	E18	E26	E23	N1						
N1	E19	E36	N1							
N1	E22	E25	E42	E32	E27	E33	329	N1		
N1	E30	E35	E44	N1						
N1	E28	E43	E37	E23	N1					
N1	E34	E41	N1							
N1	E38	N1								
N1	E39	N1								
N1	E40	N1								

Realizando el mismo procedimiento que con el modelo MTSP se determinan las distancias de las rutas, que se muestran en la Tabla 8. Para aquellos casos en que, el modelo no se utilizó para establecimientos que tenían trayectos cortos, o que, el algoritmo solamente agrupó, mas no refleja el orden en que deben ser visitados; para ello se utilizan los modelos Traveling Salesman Problem y transbordo capacitado [10]. El problema del agente viajero o TSP, fue el primer problema de VRP planteado, en este se busca que un *Viajero* visite cierta cantidad de establecimientos en un

solo viaje de manera que inicie y termine el recorrido en un mismo punto; para nuestro caso, en el Centro de acopio del Sur del País SURABASTOS; el agente viajero debe determinar la ruta a seguir para visitar cada cliente una sola vez y regresar de tal manera que la distancia total recorrida sea mínima.

Tabla 8. Distancia y tiempo de las rutas generadas

Ruta	Lunes y miércoles		Viernes	
	Distancia (km)	Tiempo (min)	Distancia (km)	Tiempo (min)
Ruta 1	34.4	239.49	26.9	267.96
Ruta 2	31.5	231	21.55	245.34
Ruta 3	7.1	55.2	28.04	198.67
Ruta 4	15.3	72	7.1	55.2
Ruta 5	23.1	151.33	18	118
Ruta 6	18.7	93.83	11.9	47.67
Ruta 7	9.6	76.5	19.8	136
Ruta 8		57	23	99.17
Ruta 9			12.8	79.7
Ruta 10			16.3	55.33
Ruta 11			18.9	51
Ruta 12			9.6	57
Ruta 13			13.2	73
Total	162.4	976.35	227.095	1484.04

Para el caso del modelo *Traveling Salesman Problem* se definen los algoritmos y las ecuaciones para desarrollar el modelo, en la Tabla 9 se presentan los parámetros definidos.

Tabla 9. Parámetros algoritmo TSP

Índices	
I	Nodos de origen
J	Nodos destino
Variables	
U_i	Etapa en la que se visita el nodo i
X_{ij}	variable binaria que activa el arco desde i a j si es 1 o lo desactiva si es 0
Parámetros	
D_{ij}	Distancia entre el nodo i al nodo j

Respecto a la función Objetivo, que tiene el mismo propósito del modelo anterior, minimizar los costos totales asociados a realizar el viaje, se denota en la ecuación (6).

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n D_{ij} * X_{ij} \quad i \neq j \quad (6)$$

Con la ecuación (7) se determinan las restricciones de entradas del nodo i, para garantizar que el camión sale de cada establecimiento una sola vez.

$$\sum_{j=0}^n X_{ij} = 1 \quad \forall i, i \neq j \quad (7)$$

Para lograr garantizar que el camión llega a cada destino una sola vez, se hace necesario definir los parámetros de Restricción de salidas al nodo j, la cual se describe en la ecuación (8).

$$\sum_{i=0}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j, i \neq j \quad (8)$$

De la misma manera, en la ecuación (9) se define la restricción de eliminación de sub-tours y lograr que no se creen rutas que no están conectadas entre sí.

$$u_i - u_j + (n - 1)X_{ij} \leq n - 2 \quad \forall (i, j), i \neq 0, j \neq 0, i \neq j \quad (9)$$

$$1 \leq X_{ij} \leq 1, u_i \geq 0$$

Una vez definidas las ecuaciones se aplicación el algoritmo, y así, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Modelo TSP. Lunes y miércoles

N1	E10	E13	E6	E26	E7	E21	E1	E20	E29	N1
N1	E2	E3	E8	E9	E11	E14	E16	E12	E5	N1
N1	E17	N1								
N1	E35	E36	E19	N1						
N1	E23	E33	E27	E22	E25	E44	E42	N1		
N1	E34	E38	E30	N1						
N1	E31	E41	E37	N1						
N1	E39	N1								

De la misma manera que en los pasos anteriores, en la Tabla 11 se muestran los resultados para el tercer día.

Tabla 11. Modelo TSP. Viernes

N1	E10	E29	E7	E1	E24	N1				
N1	E13	E2	E3	E4	E8	E6	E12	E5	N1	
N1	E21	E15	E31	E9	E11	E14	E20	E16	N1	
N1	E17	N1								
N1	E23	E18	E26	N1						
N1	E36	E19	N1							
N1	E25	E22	E27	E33	E32	E42	N1			
N1	E44	E30	E35	N1						
N1	E37	E28	E43	N1						
N1	E34	E41	N1							
N1	E38	N1								
N1	E39	N1								

Siguiendo con el procedimiento, se describe el tiempo y la distancia que da como resultado las rutas que contempla el modelo, teniendo en cuenta que el resultado de estas variables son las que definen en modelo a utilizar. La Tabla 12 describe los resultados de tiempo y distancia de las rutas.

Tabla 12. Total de tiempo y distancia de las rutas bajo el modelo TSP

Rutas	Lunes y miércoles		Viernes	
	Distancia (km)	Tiempo (min)	Distancia (km)	Tiempo (min)
Ruta 1	21.29	220	20.02	247.16
Ruta 2	26.5	215.33	16.45	157.67
Ruta 3	7.2	55.2	22.85	182
Ruta 4	11.9	67.67	7.2	55.2
Ruta 5	16.85	128.34	15.8	123.67
Ruta 6	18.55	83.33	20	46
Ruta 7	17.9	74	13.6	120.67
Ruta 8	9.6	57	18.2	88
Ruta 9			12.7	79.33
Ruta 10			16.3	55.33
Ruta 11			18.9	51
Ruta 12			9.6	57
Ruta 13			13.2	-
Total	129.79	900.87	204.82	1263.03

Finalmente, con el fin de tener varias alternativas de solución se aplica el modelo trasbordo y hallar una mejor solución entre las posibles soluciones planteadas por los modelos. Para usar el modelo de trasbordo capacitado, hubo la necesidad de realizar unas modificaciones para así adaptarlo al ruteo, en la Tabla 13 se describe el modelo.

Tabla 13. Parámetros algoritmo trasbordo capacitado

Índices	
I	Nodos de origen
J	Nodos destino
Variables	
X_{ij}	Cantidad de mercancía enviada del punto i al punto j
Parámetros	
C_{ij}	Costo de enviar la mercancía del punto i al punto j
$Ofer_i$	Oferta o producción del punto i

De la misma manera se debe realizar con las Funciones y restricciones, por lo tanto, la función objetivo, enfocada en minimizar los costos de enviar X cantidades del cliente i al j por la cantidad que es enviada, la ecuación (10) define la función.

$$\min \sum_i^n \sum_j^n C_{ij} * X_{ij} \quad (10)$$

A la función objetivo se deben asignar restricciones, una de estas en la de oferta, la ecuación (11) define dichas restricciones y permite asegura NO enviar del punto i al punto j una mayor cantidad de la que el punto i puede ofrecer.

$$\sum_j^n X_{ij} \leq 0f_i \forall i \quad (11)$$

Al igual que en los modelos anteriores, las funciones objetivo deben ir acompañadas de restricción de Demanda y de balance, en la ecuación (12) se describe la limitación de demanda, con esto permite asegura que las cantidades que son enviadas a los puntos j sea mínimo lo que el punto j pidió.

$$\sum_j^n X_{ij} \geq Dem_j \forall j \quad (12)$$

De la misma manera se plantea la ecuación (13) para la restricción de balance, con el objeto de asegurar que, en los puntos transitorios, es decir, los que no piden ni ofrecen mercancía, no se deje producto.

$$\sum_i^m X_{ij} - \sum_j^n X_{ij} = 0 \forall i, j \quad (13)$$

La ecuación (13) se da siempre y cuando los valores sean mayores o iguales a cero, a lo que se le da el nombre de restricción de No negatividad, por lo tanto, la variable siempre debe ser positiva: $X_{ij} \geq 0$. Teniendo en cuenta los parámetros del modelo, se hace necesario realizar las modificaciones para poder adaptarlo a las variables evaluadas en el trabajo de campo, en la Tabla 14 se expresan las notaciones.

Tabla 14. Notación Traslado Capacitado modificado

Índices	
I	Nodos de origen
J	Nodos destino
Variables	
Y_{ij}	Variable binaria que activa el arco i-j
Z	Valor de la función objetivo
X_{ij}	Cantidad de flujo por el arco i-j
Parámetros	
D_{ij}	Distancia entre el nodo i al nodo j
W_i	Oferta del punto i
Cap_{ij}	Capacidad de flujo entre el nodo i y el punto j

Por lo tanto, la nueva función Objetivo, que como en los otros modelos se busca minimizar el costo en que se incurre al utilizar el nodo de i a j, está representada en la ecuación (14).

$$\min \sum_{i,j}^n D_{i,j} * Y_{i,j} \quad (14)$$

Para dicha función debe existir una restricción de flujo, el cual permite asegura que en el punto I se deje únicamente la cantidad que fue pedida, como lo muestra la ecuación (15).

$$\sum_j^n X_{i,j} - \sum_j^n X_{j,i} = W_j \forall i \quad (15)$$

En la ecuación (16) se describe la restricción de Salida, que asegura que el camión sale de cada nodo una sola vez.

$$\sum_j^n Y_{i,j} = 1 \forall i \quad (16)$$

De la misma manera se plantea la restricción de entrada, en la ecuación (17) se describen los parámetros que aseguran que se el camión entre a cada nodo una sola vez.

$$\sum_i^n Y_{i,j} = 1 \forall j \quad (17)$$

Finalmente, haciendo referencia a las restricciones de Capacidad, la ecuación (18) describe dichas medidas.

$$\begin{aligned} X_{i,j} &\leq Cap_{i,j} * Y_{i,j} \forall i, j \\ X_{i,j} &\geq 0, 0 \leq Y_{i,j} \leq 1 \end{aligned} \quad (18)$$

Con las notaciones adaptadas a la investigación, los resultados obtenidos para los tres días de la semana en las que se realiza el abastecimiento están dadas en la Tabla 15.

Tabla 15. Traslado capacitado. Lunes y miércoles

N1	E10	E13	E6	E26	E29	E7	E21	E1	E20	N1
N1	E2	E3	E8	E12	E16	E14	E11	E9	E5	N1
N1	E17	N1								
N1	E35	E36	E19	N1						
N1	E23	E33	E27	E22	E25	E44	E42	N1		
N1	E34	E38	E30	N1						
N1	E31	E41	E37	N1						
N1	E39	N1								

De la misma manera, se transcriben los resultados para el día viernes en la Tabla 16.

Asimismo, como con los modelos anteriores se hallan los resultados de tiempo y distancia en cada una de las rutas, las cuales se detallan en la Tabla 17.

Tabla 16. Transbordo capacitado. Viernes

N1	E1	E29	E7	E24	E10	N1			
N1	E13	E2	E3	E4	E8	E6	E12	E5	N1
N1	E16	E14	E11	E21	E9	E15	E31	E20	N1
N1	E17	N1							
N1	E23	E18	E26	N1					
N1	E19	E36	N1						
N1	E22	E25	E27	E33	E32	E42	N1		
N1	E44	E30	E35	N1					
N1	E37	E28	E43	N1					
N1	E34	E41	N1						
N1	E38	N1							
N1	E39	N1							
N1	E40	N1							

Tabla 17. tiempo y distancia de las rutas obtenidas

Ruta	Lunes y miércoles		Viernes		
	Distancia (km)	Tiempo (min)	Distancia (km)	Tiempo (min)	
Ruta 1		21.19	213	20.02	267.96
Ruta 2		25.8	218.67	16.45	164.67
Ruta 3		7.2	55.2	22.145	184
Ruta 4		11.9	67.67	7.2	55.2
Ruta 5		16.85	133.34	15.8	113.67
Ruta 6		18.55	83.33	20	47.67
Ruta 7		17.9	74	13.5	120.67
Ruta 8		9.6	57	18.2	88
Ruta 9				12.7	79.33
Ruta 10				16.3	55.33
Ruta 11				18.9	51
Ruta 12				9.6	57
Ruta 13				13.2	73
Total		128.99	902.21	204.015	1357.5

4. CONCLUSIONES

Luego de aplicar los modelos MTSP, Heurística Fisher y Jaiiumar, y TSP, se puede aseverar que el método agente viajero múltiple (MTSP) es el modelo con la mejor solución encontrada, es decir, el más recomendable al momento de construir o planificar las rutas de entrega de la papa, desde el punto de origen, que, para este caso es la central de abastos, teniendo en cuenta que el tiempo total recorrido por el camión es de 863.7 min en 110.16 km comparado con el modelo heurística, 976.35 y 162.4 respectivamente, se evidencia un ahorro en distancias de recorrido de 67%.

Teniendo en cuenta que el modelo Heurística, agrupa las rutas para hacer las entregas, pero no el orden en que debía realizar la ruta, y que, en algunos casos no fue necesario rutear debido a su corto trayecto, se utilizaron los modelos TSP y Transbordo capacitado para aquellos casos donde cuentan con varios puntos a visitar para definir el orden de visita; encontrándose que las diferencias en distancia y tiempo son muy mínimas, es decir, que en el modelo TSP la distancia de recorrido es de 900.87km con un tiempo de 900.87 min y transbordo capacitado 128.99 y 902.21 respectivamente de lo que se puede afirmar que, cualquiera de los dos métodos son una buena opción para planear la ruta de los días lunes y miércoles.

REFERENCIAS

- [1] Auntun, J. y Robusté, P. (1998). Estrategias logísticas para la disminución de emisiones de transporte de carga en el área metropolitana de la ciudad de México. Omega.
- [2] Taniguchi, E. y Thompson, R. (2001). City Logistics: Network Modelling and Intelligent Transport Systems. McGraw-Hill.
- [3] Rushton, A., Croucher, P. y Baker, P. (2014). The handbook of logistic and distribution Management. Pearson.
- [4] Cornejo, J. et al. (2018). Un enfoque del problema dinámico de múltiples agentes viajeros con programación Heurística. Ingeniería, 15, 1-5.
- [5] Center of Excellence for Sustainable Urban Freight Systems. (2018). Recuperado: <http://www.transp.rpi.edu/>.
- [6] Guerrero, A., Pérez, R. y Olivarez, E. (2011). Un caso logístico del problema de ruteo vehicular múltiple m-VRP resuelto con la heurística Fisher & Jaikumar. CRC.
- [7] Acuña, S., Madieto, E. y Ortiz, N. (2013). Modelo de programación lineal binaria para el balance de carga de trabajo en el problema de asignación de proyectos. Logística, 17, 167-181.
- [8] Observador económico y financiero. (2018). Recuperado: <https://www.finagro.com.co/noticias>.
- [9] Hillier, F. y Lieberman, G. (2010). Introducción a la investigación de operaciones. McGraw-Hill.
- [10] Olivera, A. (2014). Heurística para problemas de ruteo de vehículos. Profesional.

Juan Santiago Calle Piedrahita¹

Gloria María Isaza Zapata²

Byron Enrique Portilla Rosero³

¹Universidad Católica Luis Amigó

²Universidad Pontificia Bolivariana

³Conecta2iot SAS

Colombia

Las comercializadoras de químicos se enfocan en las ventas, lo que incide que estas dejan a un lado las capacidades dinámicas en la gestión de su actuar diariamente; en tanto la gestión como empresa se basa en adaptarse al entorno y a la realidad de los sucesos de comercializar químicos. Por tanto, se ha detectado que las comercializadoras se enfrentan a legislaciones diversas por su orientación a la manipulación de productos químicos, relacionados con su adquisición, almacenamiento y distribución al mercado de minorista (*retail*). Por lo anterior, se indagaron las características de la gestión de las capacidades dinámicas en las empresas comercializadoras de químicos. Para cumplir con el objetivo, se realizó una investigación de corte cuantitativo, con cuestionario semiestructurado a 110 empresas comercializadoras del departamento de Antioquia, Colombia, enviados por correo electrónico, de las cuales contestaron 12 empresas, lo cual equivale al 10,90% de respuesta, que dejó exteriorizada a partir de las justificaciones brindadas por no diligenciar el cuestionario, el poco interés en ejercicios que permitan considerarlas con agentes externos la cotidianidad en las capacidades dinámicas, además del temor que les genera el enfrentarse a confrontar la realidad que viven. Los resultados evidenciaron baja disponibilidad al gestionar las capacidades dinámicas de las organizaciones al continuar con ventas ancladas en esquemas de forma tradicional, poca asesoría, falta de control interno de las bases de datos de los clientes y una adecuada condición de la gestión de marca. Finalmente, se presentan las principales características de la gestión desde un modelo de gestión de las capacidades dinámica en las comercializadoras de químicos.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de la comercialización de diversos productos se ha centrado en las ventas, cuando se deberían ubicar en la gestión dinámica de la organización, para adaptarse al entorno en forma abierta y flexible, pero las gerencias de estas se centran en la venta y no el mercadeo. Es así, como las empresas comienzan a tener una miopía al mercadeo [1] [2]. A su vez, las comercializadoras de químicos se centran en la función de calcular las ventas desde una óptica interna, dejando por fuera del ámbito de análisis la realidad externa de algunos elementos que permiten comprender al consumidor y actuar directamente. Además, las empresas requieren abrir el pensamiento sistémico para incorporar las capacidades dinámicas.

Las capacidades se dividen en frentes diferentes. La primera son las capacidades organizacionales, las cuales se centran en la gestión de talento humano. La segunda en las capacidades de mercadeo, el cual incorpora las ventas y el mercadeo, minería de datos y servicio al cliente. Tercero, las capacidades estratégicas, las cuales se enfocan en la gestión de la misión, visión además de la prospectiva de la organización. Sin embargo, las capacidades dinámicas se desarrollan en conjunto con la planeación estratégica, pero se convierten en complejas y abstractas [3]. Además, al establecer dificultades se logra activar la innovación al romper paradigmas frente a resolución de las dificultades que se pueden presentar; es decir al establecer destrucción creativa [4], que apunta a planear escenarios diversos que ayudan a gerenciar oportunamente los cambios que requieren las empresas para implementar ventajas competitivas [5] desde varios ángulos en la gestión.

La gestión de las estrategias se establece desde competencias diversas; las cuales apuntan a mejorar el desempeño de la organización a largo plazo. Las estrategias deben ser equilibradas y con suficiencia amplia [6] para adaptarse a los cambios del mundo de los negocios. Es decir, incorporar el liderazgo que lo lleve a la apertura de pensamiento de la mente gerencial para indagar intentos nuevos de aplicar la realidad de las necesidades de la empresa en su contexto, pero desde una visión externa hacia la interna; y no como sucede actualmente, de lo interno hacia lo externo [7].

Las capacidades dinámicas se centran en una construcción del entorno colaborativo [8] y en la administración del conocimiento [9] para incorporar las condiciones adecuadas de la gestión de las finanzas [10] en la realidad de su mercado objetivo. También, se centran en la realidad de incorporar los ajustes respectivos de conocer el entorno internacional para establecer las estrategias para ingresar a esos países [11]. Desde otro punto de vista, las capacidades dinámicas se configuran al integrar las capacidades dinámicas del mercadeo y las finanzas [12] al tener una relación positiva y se destacan por: innovar [13] conocimiento compartido [14] y creatividad [15]. Además, se entiende como la forma de ajustar las políticas y normas de la organización.

Esto se orienta a considerar que se distribuyen en la gerencia al establecer una visión holística nueva [16] al obtener un liderazgo oportuno y sistemático pero ligado al *benchmark* [17]. En otras palabras, las capacidades dinámicas se enfocan en la gestión del costo [18] crear, modificar y expandir las estrategias organizacionales [19] y a la integración directiva [20], donde los cambios tecnológicos apuntan a establecer condiciones de innovación diferentes [21] para enfocarse en los cambios que requiere la empresa [19]. Esto permite avizorar que, se configura en la gestión de efectos

tangibles e intangibles [22] para planear estratégicamente la organización a largo plazo, el cual se fundamenta en la estructura organizacional; la cual se instrumentaliza desde los departamentos diversos de esta como son: producción, mercadeo, finanzas, talento humano e información.

2. MÉTODO

La actual investigación se centra en el paradigma cuantitativo, basado en cuestionario semiestructurado el cual se dirigió a 110 empresas comercializadoras y lo diligenciaron en su totalidad 12 empresas de químicos en el departamento de Antioquia – Colombia. El primer paso fue indagar las empresas comercializadoras en la Cámara de Comercio de Medellín (Antioquia). Luego de esta información, se indagaron los respectivos correos electrónicos de las respectivas gerencias (general, mercadeo o producción). Segundo se estructuró el cuestionario compuesto por 10 preguntas en tres cuerpos: a) innovación, b) adaptación a capacidades dinámicas, y c) riesgo con escala Likert de 10 puntos donde el directivo tenía que posicionarse según sus percepciones entre 0: totalmente en desacuerdo o 10: totalmente de acuerdo. A su vez, se configuró el consentimiento informado, en el cual se establecía la confidencialidad de los datos de la empresa y de las percepciones de los gerentes. En la Tabla 1 se muestra la composición de los constructos y las dimensiones con sus respectivas preguntas.

Tabla 1. Constructo por dimensión

Dimensión innovación
I1 Considera la gestión de innovación segura para implementar en el negocio
I2 Participación del personal en la configuración de proyectos innovadores
I3 Son conscientes de ofertas productos de calidad con estándares nacionales e internacionales
Dimensión adaptación a capacidades dinámicas
C1 Se adaptan fácilmente al mercado
C2 Aplican instrumentos de servicio al cliente desde su requerimientos
C3 Establecen políticas de control de gestión de los sistemas de información internas como externas
C4 Realizan estudios de la competencia e investigaciones de mercados o inteligencia de mercado
Dimensión riesgo
D1 Consideran el riesgo como una oportunidad para mejorar los productos o servicios
D2 Aplican estrategias diferentes a la competencia

El cuestionario se envió por correo electrónico, pero la negativa de algunas empresas por su temor a que se recocieran las falencias internas y poco interés en adelantar procesos de introspección, orientó la estrategia para obtener la información a realizar el contacto telefónico; a partir de esta nueva estrategia se logró que desde las comercializadoras de químicos, respondieran 5 empresas por vía correo electrónico y 7 por medio telefónico, durante el mes de junio del año 2019, para un total de 12 respuestas. Los gerentes fueron contactados previamente para definir el día y hora para la ejecución de la encuesta y así evitar interferencia con el desarrollo normal de las obligaciones de estos (Tabla 2). En la cual se muestran que estas corresponden a pequeñas, mediana y grandes empresas. El estado de los contactados se relaciona de la siguiente forma: 60,6% no contestaban, el 12,4% contestaron la llamada, pero manifestaron no estar interesadas en el proyecto, el 9,7% tenían el número del teléfono errado y 17,3% habían establecido el código CIUU diferente a las actividades que realmente ejercen.

Tabla 2. Característica de la muestra

Empresa	1-9 empleados	10-49 empleados	Más de 50 empleados
Pequeña	5		
Mediana		5	
Grande			2

Tercero, al cuestionario se le realizó la fiabilidad y validación por medio de diversos métodos. La fiabilidad se constituyó por medio de analizar la confianza de los datos que se obtuvieron en la relación con la coherencia y consistencia interna; y la validez desde la misma composición. Por tanto, se enviaron a dos expertos docentes el cuestionario quienes colaboraron con la redacción y mejora de las nuevas preguntas y la forma de indagar; además, se retiraron varias preguntas y una dimensión por no tener relación con el objetivo del instrumento propuesto. A su vez, la medida de adecuación muestral *KMO* fue de 0,77 (>0.5), la cual apunta que la correlación entre dichas variables es suficientemente significativa. El análisis de consistencia interna (fiabilidad) se comprobó por medio del Alfa de Cronbach por cada constructo del análisis de esta investigación (Tabla 3). Además, el valor del nivel de significación de la prueba de esfericidad de Bartlett fue 0.

Tabla 3. Alfa de Cronbach

Constructo	Alfa de Cronbach
Dimensión innovación	0,8675
Dimensión adaptación a capacidades dinámicas	0,8385
Dimensión riesgo	0,7957

Cuarto, se digitaron las encuestas en el IMB SPSS (V.22) para el respectivo análisis e interpretación de los tres constructos. Al mismo tiempo, se revisaron las autorizaciones para no incurrir en un manejo inadecuado de los datos personales. El quinto paso se enfocó a, elaborar las ilustraciones diversas que, aportaran a una lectura principal de los datos recolectados y apuntaran a la argumentación de la investigación empero se determinó primero el aclarar que los datos se codificaron según el constructo definido y la preguntas; es decir, para la dimensión de innovación se colocó la letra I; dimensión adaptación a las capacidades dinámicas la letra C y por último la dimensión riesgo se estableció la letra D.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Capacidades Dinámicas (DC)

Las capacidades dinámicas se valoraron basados en la percepción de los gerentes ante las preguntas y las respuestas Likert. A lo cual se resume en la Figura 1, que se detecta en forma general las nueve variables del estudio en los tres constructos a indagar: innovación, adaptabilidad y riesgo.

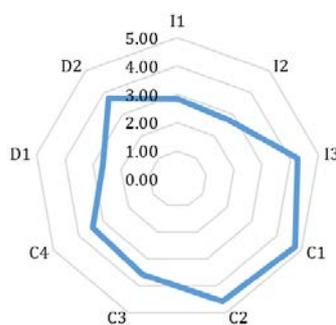


Figura 1. Valoración de capacidades dinámicas

Las capacidades dinámicas para las comercializadoras de químicos en el departamento de Antioquia, se centran principalmente en tres variables principales como son: calidad (4,25), facilidad de adaptación al mercado (4,75) y servicio al cliente (4,58). Pero las variables menos evaluadas fueron: innovación (2,83), participación del personal en proyectos (2,75) y riesgo como oportunidad (2,67).

Lo anterior permite evidenciar que las empresas se enfocan en mantener una orientación tradicional de los procesos de negocio sin dar opción al cambio que les permita acercarse a modelos que generen nuevas oportunidades de negocios. Su orientación se convierte en una constante de trabajo para mantenerse activo sin considerar la importancia que puede tener la integración del personal en la construcción de nuevas bases para un desarrollo evolutivo de la empresa tras los cambios planteados en el exterior.

Por otro lado, al mantener los procesos de negocio constantes, no da la oportunidad de tomar decisiones que puedan abrir nuevos caminos en la proyección de la empresa tras futuras eventualidades sino enfocándose a mínimos cambios disminuyendo el factor de riesgo y así mismo las posibilidades de adaptaciones futuras a grandes cambios.

3.2 Capacidades Dinámicas (DC) desde el constructo innovación

Las capacidades dinámicas desde el constructo innovación fueron calificadas en un 85,6% en forma desfavorable. El 79,6% consideran que la innovación es difícil en la implementación por ser productos químicos genéricos. Además, el 65,7% manifestaron que el personal no participa en proyectos de innovación puesto que se apoya en las pocas sugerencias de los vendedores y consideran que los productos químicos son adversos para la salud como consecuencia de la exposición de la piel y el reconocimiento de los peligros químicos. También, las fallas de ventas y la asfixia de ideas configuran un fracaso en la configuración de proyectos innovadores, lo cual aporta al déficit de las capacidades dinámicas desde la propia gestión de la marca [1] y desde la configuración de enfoque estratégico [3]. (Figura 2).

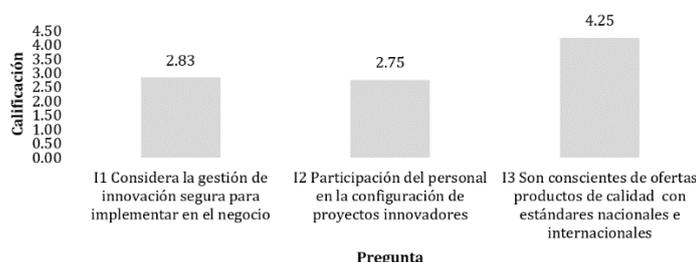


Figura 2. Valores de tres constructos de capacidades dinámicas

A su vez, la reputación de la organización se basa en la gestión de la marca [5] para lograr ofertar productos de calidad, pero al mismo tiempo genera una oportunidad para mejorar la percepción de calidad por parte de los clientes. Además, la calidad de productos químicos considera apta a la comercialización, si esta cumple con los estándares nacionales e internacionales y sus respectivos símbolos de seguridad. El desconocimiento o poca información de conceptos y la forma rutinaria de llevar el modelo de negocio lleva a concluir que las empresas se enfocan en la producción del producto y no en la cadena de pasos que conllevan a la producción de este, como se evidencia en las respuestas dadas por las empresas.

A partir de esto, las oportunidades que se dan las empresas para tener procesos de innovación son limitados y en algunos casos imperceptibles; ya que se considera como una innovación la adaptación al mercado en términos de costos o legales; de todas formas, son procesos de renovación constante que las empresas deben tener para ser competitivas acorde a unos estándares que las empresas deben acogerse para su participación en los negocios. Por otro lado, la innovación se confunde en ocasiones con el uso de tecnología; es decir al utilizar herramientas nuevas de contacto en ventas y mercadeo, las empresas las consideran como un elemento de innovación. A su vez, se reflexiona en su importancia con el desempeño de otorgar valor a la compra en el momento de cubrir las necesidades del cliente.

En síntesis, se infiere que las empresas no aplican el concepto fundamental de capacidades dinámicas desde la perspectiva de la innovación, aparentemente suplen la necesidad de cambio a partir de cambios moderados en la presentación de su servicio sin que este afecte de manera drástica su modelo de negocio.

3.3 Constructo adaptación de Capacidades Dinámicas (DC) en los recursos

Desde otro punto, el constructor de adaptación a las capacidades dinámicas detectó que las pequeñas empresas se adaptan fácilmente al mercado en un 67,2%; en un 34,3% las medianas y en un 20,4% las grandes. Además, los gerentes se enfocan en un 55,8% a buscar la competitividad en forma rápida y cambiante. Ahora bien, a la pregunta C1 Se adaptan fácilmente al mercado, es calificada con 4,75; es decir que están totalmente de acuerdo con 79,6% de los encuestados. Esto se debe a la realidad de contexto en el cual se desempeña; en otras palabras, conocen a profundidad el mercado y los respectivos requerimientos, puesto que se basan en aplicar las ventas y la asesoría al cliente, como lo sustenta Teece [21].

Ahora bien, desde el punto de la variable C2, se califica con un 4,58, es decir, un 76,4% al referirse a una técnica para asesorar a los clientes desde la óptica de los compradores; sin embargo, no se puede centrar en una estrategia de servicio al consumidor sino una combinación de estos; en otras palabras, el servicio al cliente debe apoyarse en una gestión buena de las bases de datos, minería de datos, y una gestión de relaciones con el consumidor (CRM), como se observa en la figura 3. La atención al cliente es diversa al servicio puesto que se deben analizar los requerimientos de los clientes para definir políticas que aporten a mejorar la relación con la empresa y que al final se genere fidelidad, al compararse con los estándares [17] de otras compañías, y logre un factor diferenciador [3].

Esto hace posible que la empresa se enfoque de forma específica en cada uno de sus clientes en pro de satisfacer al máximo posible sus requerimientos y necesidades con el objeto de adaptar la empresa a sus clientes y que este se sienta parte activa dentro de la empresa y que su experiencia sea positiva contribuyendo en buenos rendimientos de la empresa.

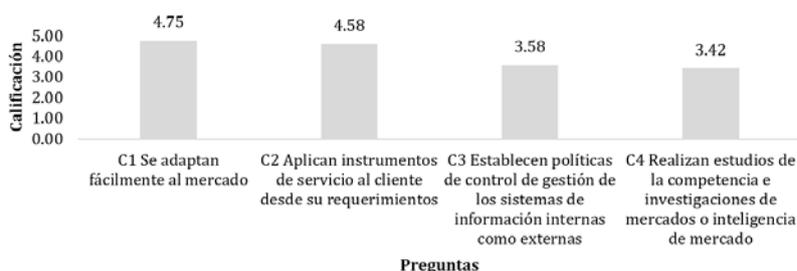


Figura 3. Configuración de capacidades dinámicas

La variable C3, fue calificada con 3,58; es decir, están parcialmente de acuerdo con gestionar el control de los diversos sistemas de información internos como externos, lo cual no se relaciona bien con una ponderación de incorporar un servicio bueno al cliente, puesto que los datos e información [7] se configuran en un conocimiento tácito, el cual es difícil de convertirlo en explícito.

La capacidad dinámica, C4 (realizan estudios de la competencia e investigaciones de mercados o inteligencia de mercado) fue valorada en 3,42, es decir, parcialmente en desacuerdo en un 57,2%, indicando que las comercializadoras de químicos no se centran en realizar estudios de mercados, puesto consideran que la imagen, marca y posicionamiento de la empresa es suficiente. Además, la toma de decisiones de los vendedores se desarrolla personalmente mientras las actividades cotidianas se demoran, debido a que están a la espera a que alguien emprenda

la acción para contribuir en la aplicación de la decisión [16] desde un apoyo del líder de la organización. También, se detectó que los vendedores detectan oportunidades y falencias en el mercado, pero estas no son divulgadas al interior de la organización, lo consideran que, es un saber propio. Sin embargo, las decisiones de los vendedores impulsan indirectamente a ejercer un cambio en el proceso de acercamiento al cliente e indagar por las reales necesidades y convertirlas en beneficios [8, 23].

En este desarrollo, se observa que, aunque los contextos en el sector de la comercialización de químicos, puedan ser diferentes por las situaciones económicas diversas que deban afrontar y del desarrollo social que, afectan entre otros, el desempeño en la gestión, estos logran generar internamente adaptaciones que se ven reflejadas en el proceso en cadena que tengan al interior de la empresa como comercializadoras de químicos. Aunque, estos tengan debilidades y sus márgenes de ganancia puedan fluctuar por el nivel de demanda, ellos se adaptan con facilidad al mercado, lo que refleja una plasticidad que permite alongarse, pero no refleja análisis de las características del mercado [7]. Por sí solo, conlleva una interiorización del proceso, se convierte en una forma de proveer acciones para subsistir como empresa, por consiguiente, es una perspectiva de los elementos necesarios para seguir avanzando y en concordancia con los requerimientos básicos que puedan asegurar una elección del medio para introducir una distribución del producto, que les pueda generar ganancia [15], o por lo menos sostenibilidad.

Otro elemento que acaece en este desarrollo se relaciona con la forma de aplicación de instrumentos de servicio al cliente desde sus requerimientos, esto se relaciona con el medio para reconocer, si el servicio prestado es atinente con lo que se ofrece, como primer orden y en cuanto a la calidad del producto se orientan reconocer su nivel de confiabilidad y cuando este es bueno se relaciona con aspectos positivos o favorables en la elección de la empresa de su proveedor, pero cuando el resultado de la encuesta es desfavorable, se recurre a hacer válidas las cláusulas de calidad que tiene con los proveedores diversos [4].

Esto genera un análisis parcial de la problemática. Aunque se tenga un sistema de instrumentos, estos denotan que se deben analizar desde ópticas varias con el fin de reconocer qué falta en el proceso implementado, donde empieza la falla y cómo está afecta y adicional, algo que no es tomado muy en cuenta, el tipo de público que posee, cuales son los intereses que tienen en el producto, aún más, cuál es la finalidad de la compra en relación al uso de este como fin del proceso [1]. Cuando se aplican estos instrumentos, las comercializadoras también tienen la posibilidad de generar imagen en el medio que, fortalece la competencia en el entorno del mercado [22], en este caso de las comercializadoras de químicos.

Este elemento, también trasciende a reconocer cuáles son las necesidades del mercado, pero no es aprovechado en su extensión dinamizadora para fructificar las capacidades que poseen. Cuando se fortalecen los sistemas en la empresa, se puede visibilizar en estos, que establecen políticas de control de gestión de los sistemas de información internas como externas lo que les lleva a incorporar participación activa de sus unidades y en ella, evidenciar como se vive cada micro-proceso [20]. Lo que lleva a generar que, estas políticas son el reflejo del pensamiento organizacional que se tiene, empero, a veces no es reconocido como tal, aunque si se practique. Este proceso puede establecer una mirada analítica del desarrollo de los productos, sus niveles de escala de distribución, en que se ha centrado y cuáles son los retos que le surgen en el devenir del sistema de comercialización.

Cuando se realizan estudios de la competencia e investigaciones de mercados o inteligencia de mercado, el proceso se puede beneficiar en tanto, este le permite conocer elementos varios como: forma de distribución del producto, principal acción externa que podría incidir en minimizar la productividad, qué de lo externo y lo interno en la comercializadora, puede convertirse en una barrera generadora de disminución de los factores positivos de esta, además de aquellos que podemos llamar catastróficos y llevar al sector a sufrir pérdidas, no solo insalvables sino que entran a generar proyecciones desfavorables en cadena [10], hacia otros sectores en forma negativa. Por ello, cuando se ha estudiado el mercado, se reconoce cómo la competencia actúa en ella, se puede tener una prospectiva clara de la inversión que se requiere, de lo que puede desarrollarse en pro de generar relaciones de expansión local, nacional e internacional [15], sin descuidar cada uno de los mercados.

En recapitulación, se detecta que las comercializadoras de químicos se centran en adaptación fácilmente en el mercado y en la aplicación de herramientas para lograr un mayor servicio al cliente. Sin embargo, las empresas fallan en dos variables: poca investigación de mercados y baja actualización de sistemas de información.

3.4 Capacidades Dinámicas (DC) desde el Constructo Riesgo

El constructo denominado riesgo se configura como en oportunidad de identificar las variables que afectan el buen desarrollo de la implementación de las capacidades dinámicas. Por tanto, la empresa debe analizar la gestión en relación con establecer medios para asemejar oportunidades en el medio y apuntar a la formulación, implementación y control de estrategias diferenciadoras. De igual forma, el riesgo y la incertidumbre se pueden reducir en cierta forma, pero es imposible volverlo cero. Es decir, la gerencia se enfoca en buscar datos e información que le ayude a reducir el riesgo basado en la toma de decisiones coherentes y argumentadas [21].

La variable D1 (consideran el riesgo como una oportunidad para mejorar los productos o servicios) se detecta que fue evaluada con un 2,67, esto es, totalmente en desacuerdo con un 44,5%. Los gerentes son adversos al riesgo porque desconocen los posibles efectos en la implementación de productos innovadores [13] basado en un producto estándar. A su vez, los gerentes no hacen esfuerzos por conservar a los empleados y capacitarlos en tendencias nuevas del mercado. Esto se refleja en un 78,6% de inconformidad en la gestión de no ubicar oportunidades diferentes, por ser comercializadoras. Sin embargo, desde los proveedores se identifican esfuerzos por elaborar desarrollos alternos en químicos con un enfoque amigable con el medio ambiente. No obstante, las empresas tienen a futuro planes de mejorar, rediseñando y/o reestructurar las áreas de ventas y mercadeo; pero se aclara que no definen una fecha cercana, lo cual frena en cierta medida la aplicación de las capacidades dinámicas por aumentar la incertidumbre [10].

Desde otro punto de vista, al analizar la variable D2, la consideran en 3,75, lo que quiere decir que en un 62,5% intentan aplicar estrategias diferentes a la competencia, pero se apoyan principalmente en la marca, prestigio, posicionamiento y servicio al cliente. Sin embargo, las empresas no identifican con claridad la realidad de su entorno porque lo considera que son comercializadoras de químicos de composición genérica (Figura 4).

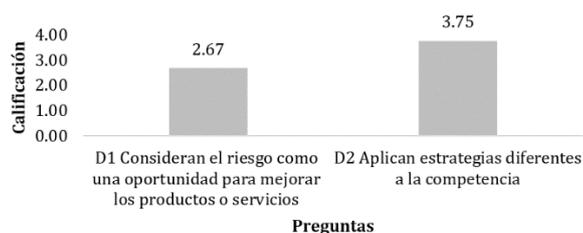


Figura 4. Valoración del riesgo

El riesgo es analizado como una barrera para la innovación desde la gerencia de las comercializadoras de químicos en Antioquia, Colombia. Lo que configura que, al tomar decisiones entre dos alternativas con el mismo valor, las decisiones económicas con adversidad al riesgo se configuran en una elección de la alternativa con menos incierto. Esto ocurre porque las empresas latinoamericanas se han centrado en medir las capacidades y resultados [24] que en actuar hacia la innovación sujeta a un riesgo potencial o real incierto. De la misma manera, el riesgo es parte de la evaluación de proyectos, pero desde el enfoque de participación del personal de las empresas en estudio, se detecta baja la percepción de participar en estos, lo cual genera un mayor riesgo de innovar [6], lo que impulsa a generar una miopía hacia el mercadeo.

Ahora bien, el riesgo no es solo intentar controlar las variables externas a la organización sino incorporar las variables internas, como es el caso de la motivación de los gerentes para asumir el riesgo. Sin embargo, los gerentes buscan aumentar la cuota de mercado, reducir costos y mejorar la calidad de los productos, pero el riesgo es inherente a estos. Entonces, las organizaciones se centran en analizar las situaciones del día a día, lo cual impulsa la pérdida de vista de una gestión con prospectiva. Pero la incertidumbre y las posibilidades significativas de fracaso con frecuencia orientan a comportamientos de aversión al riesgo y a la falta de inversión en innovación [25].

Las oportunidades para mejorar ante el riesgo, están enmarcadas en dificultades organizacionales causadas en ocasiones, por insuficientes recursos para el desarrollo de las estrategias de la empresa en mercados nacionales y extranjeros, relacionados con el funcionamiento propio del sector que generan incompatibilidad de funcionamiento, incluyen problemas que se pueden asociar con el tamaño empresarial.

El tamaño, es un elemento de competitividad necesario para la realización de inversiones en productos o procesos adecuados para la estrategia de comercialización; el riesgo surge en la mirada a la aplicación de estrategias diferentes a la competencia [24]. Cuando aplican a esa competencia se pueden encontrar que, estos comercializadores tienen la oportunidad de considerar cuáles son las dificultades tanto internas y externas que están incidiendo en su proceso. Otro elemento es, qué tanto esas estrategias pueden llegar a mercados nuevos donde no hay previamente una incidencia del producto [3], qué se está aportando o, por el contrario, el mercado que opera en ese medio, en este caso de la comercialización de productos puede llegar a mercados nuevos con productos innovación.

Sin embargo, se reconoce que la innovación para este sector no es del primer orden; algunos de ellos siguen con la producción, distribución y generación desde el sistema tradicional que han tenido, lo cual establece una forma de forjar estabilidad para salir adelante, pero es debido a su continuo proceso de empleo de la comodidad que tiene frente al riesgo [24, 25].

Este es un elemento adicional que emerge, como en las comercializadoras se puede llegar a sobrevivir con un bienestar que, aunque para algunos sea sinónimo de baja de las ventas, o fluctuación de estas, se les dificulta conseguir clientes nuevos, porque por lo general, se remiten a consumidores que son referidos de los que tiene un historial con ellos y no llegan a mercados extranjeros, con propuestas alternas, generadoras de innovación [5]. Aunque esto se traduce en forma de liderar el sector, no para todas es una posibilidad o algo viable para introducirse

en sectores nuevos, con productos que puedan concebir fuerza y marca en ese medio alterno. Por lo tanto, contribuye a que la percepción de un producto tradicional [2] pueda mejorar o por el contrario desaparecer del sector comercial y ser asumido por otros de la misma línea y diferentes a la comercializadora o salir del mercado por no generar confianza en los clientes.

El nivel de la organización para afrontar el riesgo, posiciona los recursos, las estrategias que puedan favorecer la administración de estos, el conocer cómo es el funcionamiento, cuál es el nivel de reconocimiento de los problemas que pueda tener. Así mismo, determinar el comportamiento interno y externo que hace que la comercializadora de químicos genere no solamente sostenibilidad sino también mejoramiento y posicionamiento en el medio [2].

Cuando las comercializadoras no tienen el nivel apropiado para cumplir con las demandas, generan aislamiento comercial de nuevos clientes y mercados. Otro elemento es que estas comercializadoras no están teniendo en cuenta el cruce generacional, esto es el intercambio de experiencias entre nuevos empresarios y los que llevan tiempo en el sector; ni el relevo generacional, como tampoco las nuevas configuraciones de algunos de los productos que antes eran tradicionales hoy son renovadas [3, 8, 13] y ahora tienen una interacción diferente con el ser humano.

Un elemento adicional, son las demandas y exigencias de seguridad que está ofreciendo la comercializadora al cliente, frente a la calidad, tiempo distribución y asequibilidad de los productos. Adicional, emerge en el fracaso la imposibilidad de acceder a los productos que ofrece la comercializadora, lo que genera una imagen negativa cuando está comercializadora no tienen en su haber los recursos necesarios para proveer las demandas de sus clientes.

Entonces, cuando ese genera escasez en los productos, el nivel de competitividad es segmentando, se llega a un aislamiento a nivel de mercados. Lo que debe llevar a reconocer que esta comercializadora, podría implementar estrategias en prospectiva e innovadoras para proponer acciones para mejorar ante el fracaso. Esto en el sector, es el reconocer no solamente las demandas, sino también qué es lo nuevo que puede hacer y hacia dónde puede trasladar su oferta.

En síntesis, el riesgo es una variable que afecta la realidad de innovar. Por tanto, se incorporan la forma de reducir la incertidumbre, pero a un mayor costo, lo cual impulsa a lograr una ventaja competitiva favorable para aumentar a la generación de capacidades dinámicas. Por ende, la relación entre el riesgo y la innovación se refleja en igualdad de condiciones; es decir a mayor riesgo, mayor es la innovación, sin embargo, puede ser inversa la relación de mayor innovación con menor aceptación en el mercado.

3.5 Modelo propuesto de Capacidades Dinámicas (DC) en comercializadoras de químicos

El modelo propuesto de capacidades dinámicas en las comercializadoras de químicos en el departamento de Antioquia se basan en tres constructos: innovación, adaptabilidad y riesgo. El primer factor que incide en ello, es analizar el enfoque estratégico de la organización, en el cual se considera la situación actual y la prospectiva de la organización, además, de la voluntad de la gerencia para creer en la organización a largo plazo. También se revisa la misión y visión en relación a las capacidades que posee la organización. Segundo, se realiza el diagnóstico interno y externo de la organización apoyado en el direccionamiento estratégico (Figura 5).

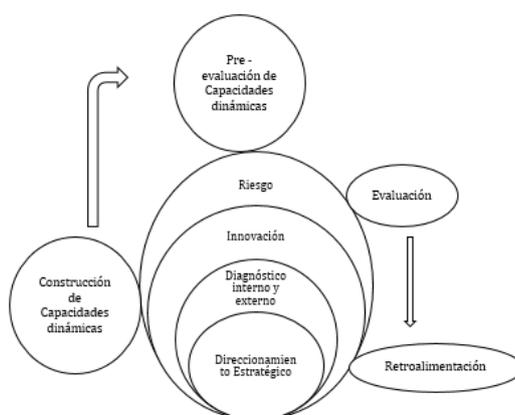


Figura 5. Modelo de Gestión de capacidades dinámicas

Tercero se realiza el estudio de capacidades de innovación, en el cual se analiza la voluntad de pensar diferente; es decir, ver los problemas como oportunidades. A su vez, se configura la intención de realizar investigación de mercados, implementar un plan de I+D+i e inducir la generación de conocimiento. Cuarto, se revisan las condiciones de reducir el riesgo. Todo en su combinación, impulsa a la construcción de capacidades dinámicas, pero antes, se analiza la pre-evaluación de las capacidades dinámicas, donde se revisan las variables de: innovación, riesgo, adaptabilidad al mercado, gestión de la información interna y externa, capacidad de adaptación a los cambios del

mercado. Seguido de esto, se analizan las evaluaciones de los respectivos escenarios para concluir la mejor forma de implementar el desarrollo de las capacidades dinámicas. Por último, se realiza la retroalimentación para ajustar el plan de ejecución e identificar con indicadores de gestión las mejoras a introducir.

El modelo expone la forma de configurar las estrategias que apuntan a buscar un factor competitivo de la organización, siempre y cuando, la gerencia opte por una mente abierta. Es decir, aportar a cambiar en los momentos requerido para impulsar el un desarrollo sostenible a largo plazo. A su vez, se apunta a lograr una mayor perdurabilidad de la organización, al comprender las necesidades de los clientes y la perspectiva de valor indirecto. Esto es combinar recursos en forma continua para impulsar innovación dinámica.

Ahora bien, el valor indirecto (percepción del cliente) en combinación con la innovación dinámica (abierta) se proclama en forma sistémica apoyada en la tecnología, la protección de propiedad intelectual, invención de nuevos modelos de negocios (unidades estratégicas de negocios), innovación abierta, adaptabilidad, flexibilidad y toma de decisiones descentralizadas. Todo lo anterior impulsa a la gestión adecuada de los recursos, identificando las oportunidades en el medio y anticipándose a las amenazas.

Las capacidades dinámicas se implementan al fortalecer la gerencia con una mente abierta y con un enfoque holístico de la organización. Además, las principales variables en la implementación de un modelo de gestión de las capacidades dinámicas al considerar tres constructos: innovación, adaptabilidad y riesgo. De igual forma, la innovación se construye desde la combinación de desarrollo de productos o servicios con factores diferenciadores que sea difíciles de imitar, que aporte a un mayor valor percibido para los clientes. Además, al configurar la combinación adecuada de los recursos, que se conviertan en procesos de innovación que, a su vez, aporte un diferenciador en el mercado, lo cual permite a las organizaciones de químicos diversificar su portafolio otorgando nuevos valores que en el mercado la competencia no los posea por un tiempo. Por otro lado, la comunicación en los diversos medios permite una comunicación dirigida a los nichos de mercado con información veraz, que aporta a la recolección de datos desde la misma investigación que apalancan nuevas ideas.

Es decir, las organizaciones, deben establecer estrategias internas y externas para analizar adecuadamente las necesidades de los grupos de interés para promocionar la innovación. Sin embargo, la estructura propia de la organización se debe modificar constantemente y ser flexible y abierta. Al mismo tiempo, debe establecer una multidimensional agregada; es decir lograr que se perciba la innovación desde su aplicación y uso en la industria.

Ahora bien, para impulsar las ventas desde la percepción de valor de los clientes externos, el cual debe tener una mirada desde afuera hacia adentro, y no desde adentro hacia afuera. Las comercializadoras tienen una oportunidad de lograr innovar al comenzar a aplicar las capacidades dinámicas por medio del uso de ventas por internet, pero ligadas a asesorías y divulgación de recomendaciones de seguridad química. Además, se identifica la oportunidad de establecer página Web con una interacción fluida (ejemplos de aplicación de productos químicos para innovar); lo cual impulsa la asequibilidad de los productos en tiempo real y establecer políticas de logística coordinada. Además, configurar redes sociales que apunten a cuidar el medio ambiente, y así, en cierta forma, disminuir la percepción de que todos los químicos son peligrosos. Pero, desde otra óptica, las comercializadoras de químicos, se les sugiere que establezcan alianzas estratégicas entre ellos para aumentar el poder de negociación y configurar que los diversos grupos de interés interactúen con la plataforma de ventas.

4. CONCLUSIONES

El estudio determinó que las capacidades dinámicas de los comercializadoras de químicos se centran en la poca adaptabilidad de gestión en el medio por que se centran en las ventas. Además, son adversos al riesgo por considerar que los productos químicos son reconocidos en el medio por su nombre genérico y por el actuar de estos. Además, las capacidades dinámicas se centran en los procedimientos y procesos de la organización para identificar oportunidades en el mercado para generar un mayor rendimiento financiero y tienen una visión de emprender nuevos retos; sin embargo, las comercializadoras de químicos utilizan los recursos para generar bajo valor de mercado, detectar y aprovechar las oportunidades e identificar oportunamente las amenazas para mantener combinar los activos tangibles o reales con los intangibles o abstractos de la empresa.

La dimensión de innovación fue evaluada con características bajas por ser productos estándares. Desde la dimensión de adaptabilidad a las capacidades dinámicas se centra en condiciones relacionadas con la marca como elementos estratégicos de posicionamiento en el mercado y de prospectiva favorable de incorporar en nichos nuevos; además el personal participa en las diversas reuniones en relación a capacitarse en la gestión de ventas y mercadeo, pero no para configurar proyectos de innovación. Además, los sistemas internos y externos que tienen la mayoría de las organizaciones del estudio son deficientes, puesto que no actualizan las bases de datos y se centran en los clientes de mayores ingresos en la atención; es decir, más personal desde un enfoque de asesoría. La dimensión de riesgo, se considera baja porque no hay políticas de estudiar con mayor profundidad a los clientes y la configuración de mejorar los productos a ofrecer, pero el campo de estrategias diferentes a la competencia se basa en la marca corporativa y en

el servicio al cliente, sin embargo, no se gestionan factores de impacto que difieran de una empresa a otra el mismo producto a ofrecer.

Con el objetivo de fortalecer el comportamiento interno y externo de las empresas de tal manera que le permita buscar un cambio adaptativo a nuevos retos de mercados, este capítulo presentó un modelo de gestión de capacidades dinámicas caracterizado por la identificación de los procesos del negocio, como estos se llevan a cabo y realizar una trazabilidad del comportamiento de los mismo. La importancia de este modelo radica en la orquestación de tres ejes centrales riesgo, innovación y adaptación de tal forma que la empresa sea consiente de los procesos que se llevan a cabo y pueda evaluar que estrategias son aplicables en determinadas líneas de tiempo de acuerdo con las necesidades y requerimientos del mercado y considerando el comportamiento de sus clientes.

Finalmente, para el éxito del modelo se requiere que las comercializadores de químicos descentralicen su modelo de negocios y que gerencia sea el eje que coordine un proceso de cambio adaptativo a una implementación de capacidades dinámicas en las cuales la participación de los integrantes se la empresa se convierta en miembros activos en un cambio sostenible aplicados en toda la cadena de los procesos de negocios.

REFERENCIAS

- [1] Gromark, J. y Melin, F. (2013). From market orientation to brand orientation in the public sector. *Journal of marketing management*, 29(9-10), 1099-1123.
- [2] Nordbø, I. et al. (2014). Market myopia in the development of hiking destinations: The case of Norwegian DMOs. *Journal of Hospitality Marketing y Management*, 23(4), 380-405.
- [3] Montoya, I. y Montoya, L. (2003). El direccionamiento estratégico y su aplicación en los sistemas complejos y en la gerencia ambiental. *Innovar*, 13(21), 81-103.
- [4] Reinert, H. y Reinert, E. (2006). Creative destruction in economics: Nietzsche, Sombart, schumpeter. In *Friedrich Nietzsche (1844-1900)* (pp. 55-85). Springer
- [5] De Castro, G. y López, J. (2006). La importancia de la reputación empresarial en la obtención de ventajas competitivas sostenibles. *Investigaciones europeas de dirección y economía de la empresa*, 12(3), 29-39.
- [6] Hamel, G. y Prahalad, C. (1993). Strategy as stretch and leverage. *Harvard business review*, 71(2), 75-84.
- [7] Johnson, W. y Filippini, R. (2013). Integration capabilities as mediator of product development practices-performance. *Journal of Engineering and Technology Management*, 30(1), 95-111.
- [8] Roncancio, P. (2011). De las capacidades dinámicas como enfoque de la estrategia a la integración de competencias para la construcción de un entorno colaborativo Universidad-Empresa. *Revista Ciencias Estratégicas*, 19(26), 295-305.
- [9] Acosta, J. et al. (2020). Sustainable Orientation of Management Capability and Innovative Performance: The Mediating Effect of Knowledge Management. *Sustainability*, 12(4), 1366.
- [10] Kamboj, S., Goyal, P. y Rahman, Z. (2015). A resource-based view on marketing capability, operations capability and financial performance: An empirical examination of mediating role. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 189(2015), 406-415.
- [11] Gonçalves, V., Bitencourt, C. y Portella, R. (2010). Dynamic capabilities development to implement international strategy: the case of a brazilian wine company. *Revista agroalimentaria*, 16(31), 81-86.
- [12] Cruz, J., López, P. y Martín, G. (2009). La influencia de las capacidades dinámicas sobre los resultados financieros de la empresa. *Cuadernos de estudios empresariales*, 19, 105-115.
- [13] Muñoz, F., Encinar, M. y Cañibano, C. (2006). Intencionalidad innovadora y dinámica económica. *Revista Empresa y Humanismo*, 18, 13-40.
- [14] Yang, C. y Lai, C. (2012). Relationship learning from organizational knowledge stores. *Journal of Business Research*, 65(3), 421-428.
- [15] Zacharias, N., Nijssen, E. y Stock, R. (2016). Effective configurations of value creation and capture capabilities: Extending Treacy and Wiersema's value disciplines. *Journal of Business Research*, 69(10), 4121-4131.
- [16] Kodama, M. (2017). Strategy Transformation Based on Holistic Leadership: A Case Study of Apple. *Developing Holistic Leadership*. Emerald.
- [17] Panizo, C. (2010). *Herramientas Gerenciales Modernas*. U. Libre de Colombia.
- [18] Winter, S. (2003). Understanding dynamic capabilities. *Strategic management journal*, 24(10), 991-995.
- [19] Helfat, C. et al. (2009). Dynamic capabilities: Understanding strategic change in organizations. John Wiley.
- [20] Teece, D. et al. (1994). Understanding corporate coherence: Theory and evidence. *Journal of economic behavior y organization*, 23(1), 1-30.
- [21] Teece, D. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic management journal*, 28(13), 1319-1350.
- [22] Helfat, C. y Winter, S. (2011). Untangling dynamic and operational capabilities: Strategy for the (N) ever-changing world. *Strategic management journal*, 32(11), 1243-1250.
- [23] Calle, J. (2018). *Comprensión del papel de las capacidades de mercadeo para generar ventajas competitivas: Caso comercializadoras de químicos*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia.
- [24] Martínez, R. y Pastor, M. (2018). Interrelación entre riesgo e innovación: percepción del riesgo por gestores de proyectos. *Journal of technology management y innovation*, 13(2), 94-103.
- [25] Finkelstein, S. (1992). Power in top management teams: Dimensions, measurement, and validation. *Academy of Management journal*, 35(3), 505-538.

En esta investigación se diseña y optimiza un gráfico de control sintético bilateral para el control de la dispersión. El gráfico controla de manera conjunta tanto incrementos como decrementos en la desviación estándar mediante la combinación de un gráfico de control S para controlar la desviación estándar de un proceso con distribución normal, y un gráfico CRL , este último es un gráfico por atributos que monitoriza con 100% de inspección, el cual consiste en el conteo de unidades inspeccionadas entre disconformidades incluyendo la última unidad no conforme. Los hallazgos encontrados resultan ser ventajosos en la mayoría de casos para ciertos parámetros de diseño cuando se compara la propuesta frente a un gráfico bilateral S . Cuando se compara el gráfico con las versiones donde el control del proceso se hace de manera independiente para incrementos y decrementos de la desviación estándar, el gráfico de control diseñado en este trabajo de investigación presenta mejoras sólo en unos casos específicos frente a al gráfico S . Con el objetivo de llevar a cabo la comparación del desempeño de los gráficos se utilizó la métrica del ARL (Average Run Length) en el escenario zero-state.

1. INTRODUCCIÓN

Los gráficos de control son herramientas ampliamente utilizados para monitorizar una característica de calidad en diferentes procesos. Usualmente, se hace uso de un gráfico para controlar la posición como, por ejemplo, el gráfico de control \bar{X} de Shewhart es utilizado para controlar la media, y otro gráfico para controlar la dispersión, en este caso el gráfico S se utiliza para controlar la desviación estándar. Esto bajo el supuesto de normalidad de los datos analizados. Sin embargo, dichos gráficos de control son poco efectivos al momento de detectar cambios pequeños o moderados en la media o la desviación; es por ello por lo que los gráficos de control han sido objeto de varias investigaciones con el ánimo de aumentar su desempeño en dichas situaciones.

El gráfico para monitorear la media propuesto Shewhart presenta actualmente numerosas variaciones. Es así como surgen gráficos que incorporan señales adicionales [1], los gráficos de medias ponderadas exponencialmente EWMA [2], los gráficos de sumas acumuladas CUSUM [3], gráficos con tamaño de muestra y/o intervalo de muestreo variable VSS VSI [4], los que integran dos gráficos en uno; dentro de estos destacan el EWMA - \bar{X} [5], el CUSUM - \bar{X} [6] y el gráfico de control sintético [7]. En trabajos posteriores se proponen gráficos como el SXC [8] quienes presentan como ventaja la simpleza de dicho gráfico al ser usado por el operario y al mismo tiempo la efectividad de un gráfico CUSUM. [9] presentan un gráfico sintético que integra el doble muestreo, mejorando el gráfico EWMA para ciertos tamaños de cambio en la media.

En cuanto al control de la dispersión son varias las propuestas que presentan mejoras al gráfico S . [10] estudia los gráficos de Shewhart con límites de advertencia y un gráfico CUSUM para el control de la desviación. Dicho trabajo es ampliado por [11] y por [12]. [13] diseñan un gráfico EWMA para monitorizar la desviación. [14] llevan a cabo una extensa comparativa entre diferentes gráficos de control para monitorear la desviación y el rango. [15] presentan un gráfico de control sintético para controlar la dispersión. [16] proponen un nuevo gráfico denominado NEWMA para monitorear la dispersión. [17] presentan un gráfico de control sintético que monitoriza de manera conjunta la media y la varianza basado en un estadístico T^2 . Por su parte, [18] diseñan un gráfico con el mismo propósito.

Los gráficos de control sintéticos propuestos por [7] y [15] para monitorizar la media y la desviación estándar respectivamente, consisten en la combinación de un gráfico \bar{X} de Shewart o S según sea el caso, y un gráfico CRL (*Conforming Run Length*) propuesto por [19]. Este tipo de gráficos han recibido bastante atención en los últimos años, presentando avances en diferentes investigaciones con el fin de mejorar su desempeño. Destaca el trabajo presentado por [20] quienes proponen un gráfico de control sintético que combina un gráfico para la desviación basado en un estimador *Downtown* [21] y el gráfico CRL . [22] presentan un panorama general de los diferentes avances del gráfico de control sintético en los últimos años. En su trabajo destacan, además de la propuesta de [20], y en concreto para el control de la dispersión, el trabajo de [23], quienes presentan avances en el control de la dispersión basados en un estadístico S^2 ; y la de [24] donde se presenta un gráfico sintético con doble muestreo (DS) para el control de dispersión.

La métrica del ARL (*Average Run Length*) o longitud media de racha por sus siglas en inglés, es comúnmente utilizada para comparar el desempeño de los gráficos de control. Dicha métrica puede ser aplicada en al menos dos distintos contextos o escenarios, *zero-state* y *steady-state*. El primero asume que al inicio del control del proceso ha ocurrido un cambio en el mismo. En el segundo se asume que el inicio del proceso se encuentra bajo control, y se mantiene en este estado hasta un instante aleatorio donde ocurre un cambio en el proceso [25, 26].

Con lo anterior, se encuentra que es amplia la literatura respecto al estudio de gráficos de control sintéticos para controlar la media y la desviación; sin embargo, en las propuestas encontradas y en especial para controlar la desviación, los cambios en la dispersión se analizan en gráficos independientes, uno, en los casos donde se quiere

monitorizar incrementos en la dispersión y otro, donde se quiere monitorizar decrementos en la dispersión. Es así como, en esta investigación, se propone un gráfico de control sintético que monitorice de manera simultanea tanto incrementos como decrementos en la desviación estándar de un proceso, a dicho gráfico se le denomina en este trabajo gráfico sintético bilateral para el control de la dispersión (en adelante gráfico sintético bilateral S).

2. MÉTODO

2.1 Gráfico de control para monitorear la dispersión bilateral S

Dadas $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, las cuales representan muestras aleatorias de tamaño n con distribución normal donde la media del proceso se denota con μ y su desviación estándar se denota con $\delta\sigma_0$; cuando el proceso está bajo control $\delta = 1$. Cuando el proceso sale de control entonces $\delta \neq 1$ y eso significa un incremento o un decremento en σ se ha presentado, por lo que el estadístico está por encima de un límite $S > K^+$ o por debajo de un límite $S < K^-$ y una señal es emitida. El cálculo del ARL para un gráfico de control que monitorice de manera conjunta incrementos y decrementos en la desviación estándar está dado por la ecuación (1).

$$ARL = \frac{1}{1 - F\left[(n-1)\left(\frac{K^+}{\delta}\right)^2\right] + F\left[(n-1)\left(\frac{K^-}{\delta}\right)^2\right]} \quad (1)$$

Donde $F(\cdot)$ denota la función de su distribución acumulada.

2.2 Gráfico CRL

El gráfico control CRL (*Conforming Run Length*) propuesto por [19] es un gráfico de control por atributos que tiene en cuenta un 100% de inspección. El gráfico lleva un conteo de unidades inspeccionadas entre dos unidades no conformes, incluyendo la última disconformidad (Figura 1).

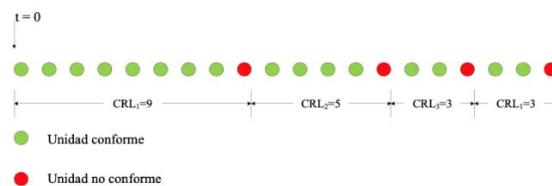


Figura 1. Conteo CRL

El número promedio de unidades inspeccionadas en una muestra CRL es dada por la ecuación (2).

$$\mu_{CRL} = \frac{1}{p} \quad (2)$$

y la función de distribución de probabilidad es dad por la ecuación (3).

$$F_p = 1 - (1 - p)^{CRL}, CRL = 1, 2 \dots \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que el objetivo es poder detectar el incremento de la fracción no conforme p , solo un límite inferior de control L es necesario en el gráfico CRL y dicho límite debe ser redondeado a un entero, con lo que si una muestra CRL es menor o igual que L hay una probabilidad que la fracción no conforme p sea elevada, con lo que podría estar en un proceso fuera de control. El ARL para un gráfico CRL es el número de muestras CRL requeridas para detectar un cambio en p . Por lo tanto, el ARL para el gráfico CRL viene dado por la ecuación (4) [15].

$$ARL_{CRL} = \frac{1}{F_p(L)} = \frac{1}{1 - (1-p)^{L-1}} \quad (4)$$

Para el caso del gráfico CRL , una medida común para establecer el desempeño de gráfico es el ANI (Average Number Inspected). Se tiene entonces que en la ecuación (5) [15]:

$$ANI_{CRL} = \frac{1}{p} \times \frac{1}{1 - (1-p)^{L-1}} \quad (5)$$

2.3 Diseño del gráfico de control sintético bilateral S

El gráfico de control sintético bilateral S consiste en la utilización conjunta de un gráfico S bilateral y un gráfico CRL . El objetivo del gráfico es monitorizar la desviación estándar de una variable en un proceso con distribución normal.

Se debe tener en cuenta que la media y la desviación estándar de dicho proceso deben ser conocidas cuando este se encuentra bajo control. Una unidad inspeccionada en el gráfico *CRL* es en este caso una muestra de tamaño n en el gráfico *S*. El gráfico sintético bilateral es especialmente diseñado para detectar cambios en cualquier sentido de variación de la desviación estándar, incrementos y decrementos. El modo de operación del gráfico sintético bilateral es el siguiente (Figura 2 y Figura 3):

1. Establezca los límites de control K^+ y K^- para el gráfico *S* y el límite inferior L del gráfico de control *CRL*.
2. En un instante i tome una muestra aleatoria de n observaciones y calcule la desviación S .
3. Si el estadístico S cumple la condición $S < K^+$ o $S > K^-$ en el gráfico de control *S*, entonces se afirma que la muestra es conforme y se vuelve al paso 2. De lo contrario la muestra es denominada no conforme y se prosigue al paso 4.
4. Contabilice el número de muestras en el gráfico *S* entre la muestra actual y la anterior muestra no conforme. Este número es contabilizado como una muestra para el gráfico *CRL*.
5. Si la muestra es mayor que el límite de control L especificado para el gráfico *CRL* entonces se afirma que el proceso se encuentra bajo control y se debe volver al paso 2. En caso contrario se asume que el proceso se encuentra fuera de control y se continúa con el paso 6.
6. Se genera una señal de fuera de control.
7. Tome las acciones necesarias para encontrar y eliminar las causas asignables de la salida de control y volver a 2.

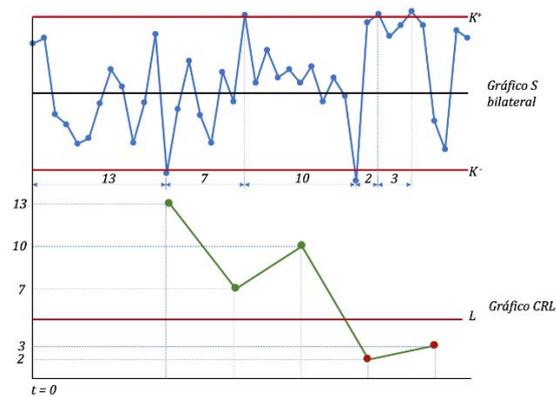


Figura 2. Esquema del gráfico de control sintético bilateral para el control de la dispersión

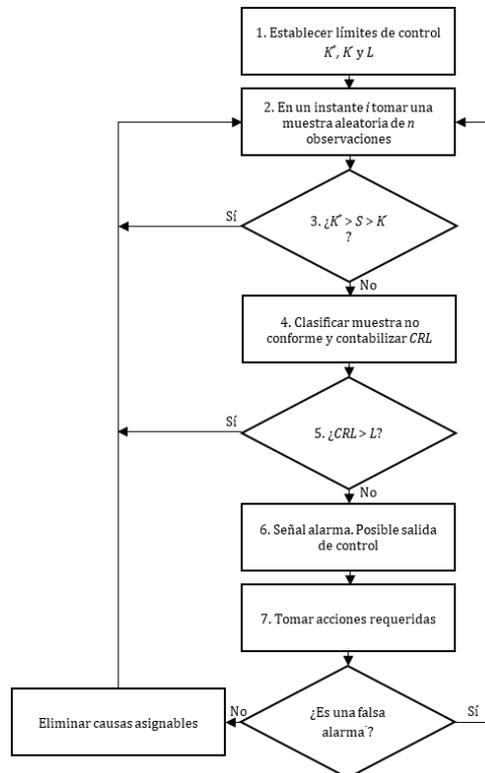


Figura 3. Operación del gráfico de control sintético bilateral para el control de la dispersión

2.4 Cálculo del ARL en el gráfico de control sintético bilateral S

A partir de las expresiones (1) y (5) donde se obtiene el *ARL* del gráfico *S* y el *ANI* de un gráfico *CRL*, es posible calcular el *ARL* en el gráfico bilateral sintético para controlar la dispersión utilizando la ecuación (6).

$$ARL_{Synth_Bilateral_S} = \frac{1}{1-F\left[(n-1)\left(\frac{K^+}{\delta}\right)^2\right]+F\left[(n-1)\left(\frac{K^-}{\delta}\right)^2\right]} \times \frac{1}{1-\left\{1-\left[1-F\left[(n-1)\left(\frac{K^+}{\delta}\right)^2\right]+F\left[(n-1)\left(\frac{K^-}{\delta}\right)^2\right]\right]\right\}^{L-1}} \quad (6)$$

Donde: $F(\cdot)$ denota la función de su distribución acumulada.

Es necesario obtener el valor de los límites de control para el gráfico sintético bilateral S teniendo en cuenta un ARL bajo control determinado; para ello, considérese un valor de probabilidad P' el cual se debe obtener resolviendo numéricamente la ecuación (7).

$$ARL(\delta' = 1)_{Synth_Bilateral_S} = \frac{1}{P'} \times \frac{1}{1-\{1-P'\}^{L-1}} \quad (7)$$

Obtenido el valor de probabilidad P' , se deben establecer los valores de los límites de control superior K^+ e inferior K^- para el gráfico sintético bilateral S . Entonces, para obtener el valor K^+ se debe resolver numéricamente la ecuación (8), y para obtener el valor K^- se debe resolver numéricamente la ecuación (9).

$$\frac{1}{1-F[(n-1)(K^+)^2]} = \frac{1}{\left(\frac{P'}{2}\right)} \quad (8)$$

$$\frac{1}{F[(n-1)(K^-)^2]} = \frac{1}{\left(\frac{P'}{2}\right)} \quad (9)$$

Donde: $F(\cdot)$ denota la función de su distribución acumulada.

Cuando se presente un cambio en el proceso es posible establecer un ARL fuera de control, es decir un $ARL(\delta' \neq 1)$, con lo que el valor de la desviación estándar σ_0 pasa a ser $\delta'\sigma_0$. Por lo tanto, si determina un cambio de diseño δ'_d para el gráfico sintético bilateral con valores de límites de control superior K^+ e inferior K^- obtenidos para un límite L y un ARL bajo control determinados, el ARL fuera de control se calcula resolviendo la expresión (10).

$$ARL(\delta'_d)_{Synth_Bilateral_S} = \frac{1}{1-F\left[(n-1)\left(\frac{K^+}{\delta'_d}\right)^2\right]+F\left[(n-1)\left(\frac{K^-}{\delta'_d}\right)^2\right]} \times \frac{1}{1-\left\{1-\left[1-F\left[(n-1)\left(\frac{K^+}{\delta'_d}\right)^2\right]+F\left[(n-1)\left(\frac{K^-}{\delta'_d}\right)^2\right]\right]\right\}^{L-1}} \quad (10)$$

2.5 Proceso de optimización del gráfico de control sintético bilateral

Con el fin de obtener los valores de límites de control adecuados K^+ , K^- y L que permitan la obtención un ARL óptimo, es decir, un conjunto de límites que minimicen el valor de ARL se ha adaptado para la presente investigación un procedimiento que cumple con tal cometido. Dicho procedimiento se describe a continuación:

1. Especificar δ'_d , n y ARL bajo control.
2. Inicializar con el límite inferior para el gráfico CRL en 2, $L=2$.
3. Obtener los valores de K^+ y K^- resolviendo numéricamente las ecuaciones (7), (8) y (9).
4. Calcular el valor de $ARL(\delta'_d)_{Synth_Bilateral_S}$ con el valor actual de K^+ , K^- y L utilizando la ecuación (10).
5. Si el valor de $ARL(\delta'_d)_{Synth_Bilateral_S}$ disminuye, se incrementa el valor de L en una unidad y se vuelve al paso 3. Si el valor de $ARL(\delta'_d)_{Synth_Bilateral_S}$ se incrementa, se detiene el procedimiento de búsqueda y se resta una unidad al valor de L con el que el $ARL(\delta'_d)_{Synth_Bilateral_S}$ aumentó y se debe continuar con el paso 6.
6. Los valores de K^+ , K^- y L actuales son establecidos como parámetros de diseño del gráfico de control el gráfico de control sintético bilateral S .
7. Se finaliza el proceso de búsqueda de los valores óptimo para el gráfico de control sintético bilateral S .

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Desempeño del gráfico de control sintético bilateral S

Con las expresiones necesarias para determinar el valor del ARL para el gráfico de control sintético bilateral S , es necesario ahora calcular dichos valores para un ARL bajo control establecido, lo que conduce a la obtención de valores de límites de control adecuados para dicho ARL óptimo y, por ende, la obtención de diferentes valores de ARL fuera de control, es decir, para diferentes valores de magnitudes de cambio δ'_d . En esta investigación se determina un ARL bajo control de 370, tamaños de muestra de $n = 5, 10, 15, 20$; y magnitudes de cambio de $\delta'_d = 0,5; 0,7; 0,9; 1,05; 1,1; 1,2$. Cabe recordar que el escenario para la obtención de los valores de ARL es en el *zero-state*.

En la Tabla 1 son presentados los valores de *ARL* fuera de control de un gráfico de control bilateral *S* los cuales son comparados con la propuesta de la presente investigación, el gráfico de control sintético bilateral *S*, para diferentes tamaños de muestra y diferentes magnitudes de cambio y un valor de *ARL* bajo control de 370. Estos valores fueron corroborados mediante simulación.

Tabla 1. Comparación de valores de *ARL* óptimos, *ARL* bajo control 370

δ'_d	Tipo de gráfico	<i>n</i>			
		5	10	15	20
0,5	<i>Bilateral S</i>	51,35	6,144	2,175	1,346
	<i>Synth bilateral S</i>	13,59	1,77	1,11	1,01
	<i>S < 1</i>	26,82	3,97	1,7	1,19
	<i>Synth S < 1</i>	5,25	1,31	1,04	1,01
0,7	<i>Bilateral S</i>	184,26	49,9	20,35	10,56
	<i>Synth bilateral S</i>	109,89	16,88	6,08	3,28
	<i>S < 1</i>	93,56	27,42	12,12	6,76
	<i>Synth S < 1</i>	33,02	7,14	3,28	2,09
0,9	<i>Bilateral S</i>	445,29	310,98	229,26	176,89
	<i>Synth bilateral S</i>	459,04	280,99	175,72	119,18
	<i>S < 1</i>	245,62	164,63	121,39	94,57
	<i>Synth S < 1</i>	175,06	93,86	60,13	42,41
1,05	<i>Bilateral S</i>	253,29	227,5	207,42	190,54
	<i>Synth bilateral S</i>	214,89	184,83	162,4	144,26
	<i>S > 1</i>	SD	SD	SD	SD
	<i>Synth S > 1</i>	SD	SD	SD	SD
1,1	<i>Bilateral S</i>	159,42	119,76	95,34	78,5
	<i>Synth bilateral S</i>	115,06	78,48	58,13	45,19
	<i>S > 1</i>	106,84	75,56	59,14	48,55
	<i>Synth S > 1</i>	64,54	40,15	29,11	22,66
1,2	<i>Bilateral S</i>	64,41	36,85	24,84	18,21
	<i>Synth bilateral S</i>	37,5	19,11	12,15	8,64
	<i>S > 1</i>	42,46	24,43	16,82	12,6
	<i>Synth S > 1</i>	21,27	11,03	7,32	5,44

SD: sin datos

En la Tabla 1 también se han incluido los valores de *ARL* fuera de control para el gráfico *S* y para el gráfico de control sintético para la desviación propuesto por [15]. Cabe recordar que estas dos últimas propuestas generan de manera independiente gráficos para los casos en donde se quiera detectar incrementos (*S > 1* y *Synth S > 1*) o decrementos en la desviación estándar (*S < 1* y *Synth S < 1*) respectivamente. Los porcentajes de mejora del gráfico de control sintético bilateral *S* frente al gráfico de control bilateral *S* se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentajes de mejora de *ARL* óptimos, entre el gráfico el gráfico de control sintético bilateral *S* y el gráfico *S* bilateral. *ARL* bajo control 370

δ'_d	<i>n</i>			
	5	10	15	20
0,5	73,53%	71,19%	48,97%	24,96%
0,7	40,36%	66,17%	70,12%	68,94%
0,9	-3,09%	9,64%	23,35%	32,62%
1,05	15,16%	18,76%	21,70%	24,29%
1,1	27,83%	34,47%	39,03%	42,43%
1,2	41,78%	48,14%	51,09%	52,55%

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se aborda la temática del diseño y optimización de un nuevo gráfico de control para el control de la dispersión. Al revisar la literatura, se encuentran varias propuestas enfocadas a la utilización combinada de dos gráficos, esto con el fin de mejorar el desempeño de propuestas existentes. Destacan los denominados gráficos de control sintéticos, que para el caso concreto del control de la desviación estándar combinan un gráfico *S* y un gráfico *CRL*. Sin embargo, dentro de los gráficos reportados en la literatura, se presentan propuestas encaminadas al control de los incrementos y los decrementos en la desviación estándar de manera independiente, es decir, es necesario generar un gráfico para el caso en que un corrimiento δ'_d sea mayor que 1 y otro gráfico a parte para cuando el corrimiento δ'_d es menor que 1. Con esto, se decide explorar la posibilidad de generar un gráfico de control sintético para el control de la dispersión en un proceso, pero que dicho control sea en un solo gráfico que incluya los incrementos y los decrementos en la desviación estándar. A este gráfico se le ha denominado en esta investigación gráfico de control sintético bilateral para el control de la dispersión.

Es así como se establece el modo de operación del gráfico sintético bilateral *S* y se caracterizan las expresiones estadísticas necesarias que permitan establecer los parámetros de diseño adecuados para el gráfico. Se utiliza la métrica del *ARL* en el escenario *zero-state* como medida de desempeño del nuevo gráfico propuesto, con lo que es

posible determinar los valores de límites de control adecuados para obtener los valores de ARL óptimos del gráfico, esto mediante un proceso de optimización presentado. Los valores obtenidos fueron corroborados mediante simulación. Finalmente, el desempeño del gráfico de control sintético bilateral S es comparado con un gráfico bilateral S . La propuesta de esta investigación, gráfico de control sintético bilateral S presenta en general un mejor desempeño que un gráfico bilateral S , salvo para valores de decrementos pequeños de la desviación, y tamaños de muestra pequeños, por ejemplo, para δ'_d igual a 0,9 y un tamaño de muestra n igual a 5. Para el resto de los parámetros analizados, el gráfico de control sintético bilateral S mejora sustancialmente su desempeño al gráfico bilateral S , siendo en algunos casos hasta el 73%.

Cuando se compra el desempeño del gráfico de control sintético bilateral S frente a la propuesta [15], se encuentra que no se mejora en ningún caso. Se evidencia entonces que, en términos de desempeño y sobre todo para corrimientos pequeños, es mejor estrategia llevar a cabo un control independiente cuando se quiere detectar incrementos y decrementos en la desviación. Sin embargo, si se pretende llevar a cabo un control conjunto de la desviación estándar, donde se desee detectar incrementos y decrementos en un solo gráfico y los tamaños de las descorrecciones no sean pequeñas, el gráfico de control sintético bilateral es una muy buena opción, incluso, esta propuesta llega a mejorar el ARL del gráfico S para control independiente de incrementos y decrementos, concretamente para cambios grandes en los corrimientos y tamaños de muestra mayores a 10.

REFERENCIAS

- [1] Champ, C. y Woodall, W. (1987). Exact results for Shewhart control charts with supplementary runs rules. *Technometrics*, 29(4), 393-399.
- [2] Lucas, J. y Saccucci, M. (1990). Exponentially weighted moving average control schemes: properties and enhancements. *Technometrics*, 32(1), 1-12.
- [3] Woodall, W. y Adams, B. (1993). The statistical design of CUSUM Charts. *Quality engineering*, 5(4), 559-570.
- [4] Costa, A. (1997). X chart with variable sample size and sampling intervals. *Journal of Quality Technology*, 29(2), 197-204.
- [5] Klein, M. (1996). Composite Shewhart-EWMA statistical control schemes. *IIE transactions*, 28(6), 475-481.
- [6] Westgard, J. et al. (1977). Combined Shewhart-CUSUM control chart for improved quality control in clinical chemistry. *Clinical Chemistry*, 23(10), 1881-1887.
- [7] Wu, Z. Y Spedding, T. (2000a). A synthetic control chart for detecting small shifts in the process mean. *Journal of Quality Technology*, 32(1), 32-38.
- [8] Wu, Z. et al. (2006). SCX control chart. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 30(5), 444-51.
- [9] Khoo, M. (2003). Design of run rules schemes. *Quality engineering*, 16(1), 27-43.
- [10] Page, E (1963). Controlling the standard deviation by CUSUMs and warning lines. *Technometrics*, 5(3), 307 - 315.
- [11] Tuprah, K. y Ncube, M. (1987). A comparison of dispersion quality control charts, *Sequential Analysis* 6(2), 155-163.
- [12] Chang, T. y Gan, F. (1995). A cumulative sum control chart for monitoring process variance. *Journal of Quality Technology*, 27(2), 109-119.
- [13] Crowder, S. y Hamilton, M. (1992). An EWMA for monitoring a process standard deviation. *Journal of Quality Technology*, 24(1), 12-21.
- [14] Lowry, C., Champ, C. y Woodall, W. (1995). The performance of control charts for monitoring process variation. *Communications in statistics. Simulation and computation*, 24(2), 409 - 437.
- [15] Huang, H. y Chen, F. (2005). A synthetic control chart for monitoring process dispersion with sample standard deviation. *Computers & Industrial Engineering*, 49(2), 221-240.
- [16] Shu, L. y Jiang, W. (2008). A new EWMA chart for monitoring process dispersion. *Journal of Quality Technology*, 40(3), 319-331.
- [17] Costa, A. y Rahim, M. (2006). Synthetic control chart for monitoring the process mean and variance, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(1), 81-88.
- [18] Hawkins, D. y Deng, Q. (2009). Combined charts for mean and variance information. *Journal of Quality Technology*, 41(4), 415-425.
- [19] Bourke, P. (1991). Detecting a shift in fraction nonconforming using run-length control charts with 100% inspection. *Journal of Quality Technology*, 23(3), 225-238.
- [20] Rajmánya, S. y Ghute, V. (2014). A synthetic control chart for monitoring process variability. *Quality and Reliability Engineering International*, 30(8), 1301-1309.
- [21] Abu, M. y Abdullah, M. (2000). Estimating the process standard deviation based on Downton's estimator. *Quality Engineering*, 12(3), 357-363.
- [22] Rakitzis, A. et al. (2019). An overview of synthetic-type control charts: Techniques and methodology. *Quality and Reliability Engineering International*, 35(7), 2081-2096.
- [23] Guo, B., Wang, B. y Cheng, Y. (2015). Optimal design of a synthetic chart for monitoring process dispersion with unknown in-control variance. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 78-87.
- [24] Lee, M. y Khoo, M. (2017). Synthetic double sampling s chart. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 46(12), 5914-5931.
- [25] Shongwe, S. y Graham, M. (2019). Some theoretical comments regarding the run-length properties of the synthetic and runs-rules X monitoring schemes—part 1: zero-state. *Quality Technology & Quantitative Management*, 16(2), 170-189.
- [26] Shongwe, S. y Graham, M. (2019). Some theoretical comments regarding the run-length properties of the synthetic and runs-rules X monitoring schemes—part 2: steady-state. *Quality Technology & Quantitative Management*, 16(2), 190-199.

Yuber Liliana Rodríguez-Rojas¹

Ana María Luque-Clavijo²

Harold Hernández Cruz¹

Julián Andrés Riveros Clavijo³

¹Universidad Santo Tomás

²Consultora independiente
Colombia

³University College London
Inglaterra

La gestión de la investigación, académica y empresarial incluye la identificación de líneas de investigación que direccionen los fondos y los esfuerzos técnicos de grupos que se dedican a actividades de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) y aunque se han descrito diversas metodologías para conseguir dicho propósito, tanto cuantitativas como cualitativas, la triangulación de métodos no ha estado presente en ninguna de ellas. El objetivo de esta investigación fue la validación de una metodología que vincule tanto la perspectiva de partes interesadas como de otras fuentes de información externa, por cuanto este capítulo muestra resultados parciales de la metodología ágil propuesta para la definición o el fortalecimiento de líneas de investigación en grupos de investigación académicos o empresariales. Los resultados muestran la inclusión de cinco acciones independientes que posteriormente deben ser triangulados para definir prioridades y recomendaciones enfocadas a la toma de decisiones definitivas; además constituye la base de una metodología instruccional completa/compleja.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se cuenta con acceso a grandes volúmenes de datos que permiten identificar tendencias de investigación, así como oportunidades de generación de nuevo conocimiento e incluso nuevos negocios. Para ello, se han creado diversas estrategias, entre ellas *big data* [1], ciencimetría [2], bibliometría [3], mapas de ciencia [4], revisiones sistemáticas [5], meta análisis [6], entre otras. Aunque se han creado diversas metodologías para la indagación de datos que permita la toma de decisiones aún no se encuentra una metodología que triangule información y datos para la definición y fortalecimiento de líneas de investigación.

Usualmente las universidades crean las líneas de investigación de acuerdo con el objeto de estudio de los programas académicos que ofertan o a partir de los intereses investigativos de los profesores, muchas veces se quedan en un nivel individual o anclado a las temáticas de investigación adelantadas en sus procesos de formación de posgrado. Es de resaltar que, en la actualidad se requiere crear nuevos espacios de formación que atiendan a las necesidades de desarrollo organizacional y a las oportunidades de crecimiento económico de los países y no solo a los objetos de estudio de las disciplinas en las que forma tradicionalmente.

Por otra parte, las organizaciones requieren desarrollar nuevos productos y servicios que atiendan y superen las necesidades y expectativas de sus partes interesadas, es por ello, que la investigación y el análisis de datos les permiten encontrar nuevas oportunidades de desarrollo e innovación en sus productos y servicios.

Es importante resaltar que estudios como el de Holmes et al [7], en cuanto a las dinámicas de los grupos empresariales, proponen la revisión de la literatura como un método para definir agendas de investigación en los grupos empresariales o en este caso de investigación; esa revisión contempló las investigaciones publicadas en el 2015 en Financial Times Research Rankings list, puesto que estos consideran los principales puntos de vista académicos. Posteriormente incluyeron los journals más reconocidos en el campo de la gestión de la administración y la gestión estratégica, los cuales brindaron los focos esenciales en estrategia internacional. Se efectuó un análisis de contenido considerando como ejes de análisis el país, la perspectiva teórica, las características de los grupos de negocio y los resultados de las variables propuestas en los artículos. En su estudio se evidenciaron cuatro oportunidades acerca del gobierno de los grupos empresariales, a saber:

- Examinar puntos de vista opuestos sobre determinadas contingencias. Los autores refieren que el uso de meta análisis puede ayudar a responder inquietudes como en qué medida y en qué condiciones se genera la concentración de las propiedades, cuáles tipos de propiedades crean valor agregado y apropiación en los grupos de negocio.
- Analizar las relaciones intraorganizacionales y extraorganizacionales de tal modo que logre identificar cómo las relaciones verticales y horizontales entre los grupos corporativos o empresariales dan acceso a los recursos. Se ha identificado en la literatura que las relaciones verticales evidencian propiedad y control mientras que las horizontales promueven la cohesión e integración.
- Analizar las formas en que las juntas de socios de las organizaciones afiliadas configuran la estrategia del grupo empresarial. En este punto se ha encontrado que los directores de los grupos corporativos comparten información

acerca de las mejores prácticas, los nichos de mercado y los nuevos productos, los socios potenciales, estrategias organizacionales, entre otras.

- Comprender cómo funcionan las diferentes prácticas de gobierno corporativo.

Otro de los estudios que evidencia el uso de una metodología formal para la definición y priorización de líneas de investigación es el desarrollado en la Asociación Andaluza de Enfermería Comunitaria (ASANEC), en el cual se aplicó la técnica de Delphi con los miembros de los equipos de trabajo [8]. Bajo este contexto, al explorar la literatura se evidencia la escasez de metodologías que den cuenta de los pasos a considerar para la toma de decisiones basada en datos y evidencia alrededor de la creación o fortalecimiento de líneas de investigación. Cabe precisar que, es probable que dada la naturaleza institucional e interna de las decisiones alrededor de la orientación de la investigación, no se publiquen las metodologías usadas para ello.

En este sentido, se detectó la necesidad de presentar en este capítulo de libro una Metodología ágil para la definición y fortalecimiento de líneas de investigación denominada IASO, dirigida tanto a grupos de investigación académicos como empresariales.

2. MÉTODO

Esta metodología partió de la definición de las 5 acciones para la toma de decisiones en Investigación, Desarrollo e Innovación I+D+i fundamentadas en 35 artículos tomados de Scopus, Ebsco, Science Direct y Scielo [9]. Una vez definidas las acciones estas fueron sometidas a consulta a 14 expertos para su validación de contenido. A cada constructo de la metodología se le evaluó la pertinencia, la claridad siguiendo los criterios propuestos por Rodríguez y Molano [10] y la aplicabilidad; para esto, se diseñó un instrumento con 21 ítems, el cual se validó con la teoría clásica del test y su fiabilidad se midió a través del coeficiente Alfa de Cronbach alcanzando un resultado de 0.89, lo que indica su alta confiabilidad [11].

Para la definición o el fortalecimiento de líneas de investigación en grupos académicos o empresariales, inicialmente se plantearon cinco acciones metodológicas descritas en la Figura 1.

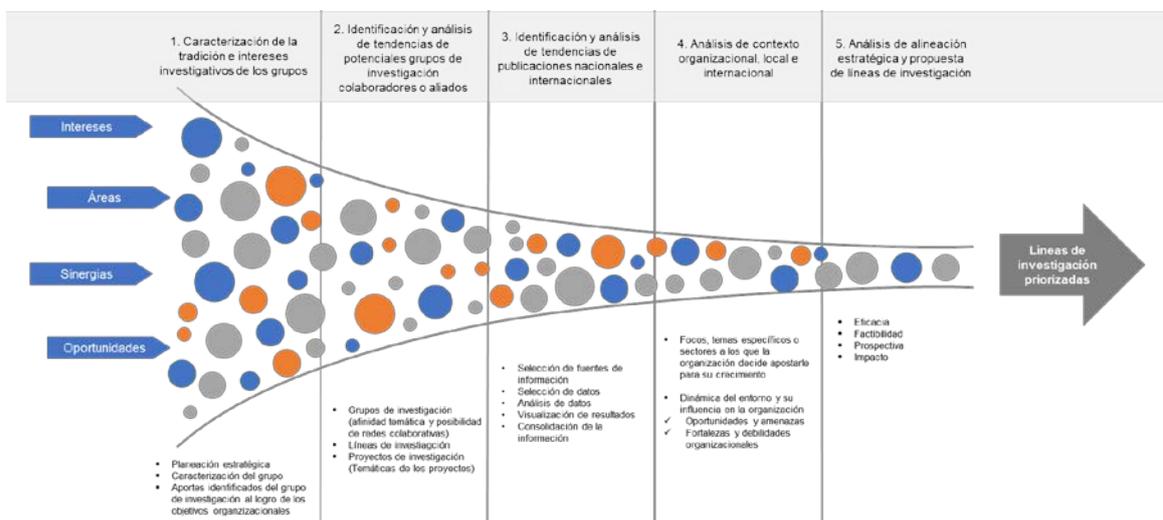


Figura 1. Reducción IASO para la definición o fortalecimiento de líneas de investigación. Fuente: Elaboración propia.

Una vez ajustada la metodología de acuerdo con los resultados de la validación de contenido, esta fue sometida a una aplicación real en pro de la validación de su constructo, en dos grupos de investigación, uno de ellos consolidado y el otro en proceso de consolidación en el ámbito de sistemas de gestión. Se tomó la información documental de cada grupo de investigación y los datos requeridos por cada una de las acciones o etapas de la metodología IASO propuesta. La recolección de datos y el procesamiento de la información fue realizado por un equipo interdisciplinar con conocimiento en recopilación, procesamiento y análisis de datos cualitativos y cuantitativo, derivados tanto de literatura blanda o gris como de literatura científica. El proceso de definición de las ponderaciones fue dado por un equipo de trabajo que incluye profesionales que ingeniería, ciencias de la salud, ciencias humanas y ciencias sociales. Se denominó IASO dado que corresponde al resultado de las primeras 4 acciones de la metodología:

- Acción 1: Permite listar los intereses (I) del grupo de investigación o de la organización en materia de la investigación.
- Acción 2: Permite listar las áreas (A) de investigación trabajadas por potenciales grupos de investigación colaboradores o aliados.

- Acción 3: Permite listar las Sinergias (S) de los sectores público-privados.
- Acción 4: Permite listar las oportunidades (O) para el desarrollo de la investigación vistas desde el contexto global y organizacional.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se presentan los resultados de la validación del constructo efectuada sobre la metodología IASO para definición y fortalecimiento de líneas de investigación, así como la descripción de cada una de acciones de la versión final de la metodología en mención.

3.1 Hallazgos del proceso de validación de constructo

La aplicación de la metodología en los grupos de investigación, objeto de análisis, llevó a efectuar ajustes internos, los cuales se describen con detalle en la Tabla 1.

Tabla 1. Ajustes internos de las acciones a partir de la validación de constructo. Fuente: Elaboración propia.

Ajustes efectuados	
Acción 1	Esta acción mantuvo todos los tópicos contemplados en la versión inicial de la metodología para la tradición e intereses investigativos de los grupos se caracterizará mediante la revisión y análisis de las acciones que se describen a continuación: a) Planeación estratégica de la organización, b) Caracterización del grupo, c) Caracterización de la producción del grupo de investigación, d) Intereses, e) Aportes identificados del grupo de investigación al logro de los objetivos organizacionales. En relación con la caracterización de los grupos no fue necesario utilizar la herramienta de análisis de impacto Scopus con indicador SJR (Scimago Journal Rank) del grupo Scimago – Scopus, cuyo fin es medir el impacto de los autores y publicaciones. Se tendrán en cuenta: Scopus TopCited, área de conocimiento, revista académica (Ranking mundial), año de publicación, citas.
Acción 2	Se ajustó la denominación de la acción quedando así identificación y análisis de tendencias de potenciales grupos de investigación colaboradores o aliados. Se eliminaron los siguientes indicadores: a) enfoques de investigación y metodologías abordadas –debido a que el sistema ScienTI no proporciona datos base para este análisis-, b) Aspectos diferenciadores en términos de los enfoques investigativos y su producción. c) Análisis de coherencia entre las líneas de investigación declarada y la producción real o su planeación estratégica dependiendo de su eje disciplinar, según corresponda. d) Impacto social visto desde la cobertura en prensa. En relación con el punto d fue suprimido de esta acción dado que se incluyó en la acción 3.
Acción 3	La acción 3 en su naturaleza descriptiva se mantuvo; sin embargo, en el momento de operacionalizar se requirió establecer criterios metodológicos afines entre el componente no-estructurado y el estructurado.
Acción 4	La acción 4 requirió un ajuste, puesto que se evidenció que la matriz DOFA no aporta la claridad de la información que se requiere para la toma de decisión en materia de la definición de las líneas de investigación por consiguiente se incorporaron nuevas orientaciones relacionadas con los intereses, áreas, sinergias y oportunidades.
Acción 5	Atendiendo al ajuste efectuado en la acción anterior, la acción 5 requirió precisión en la matriz de calificación denominada Orientaciones IASO (Intereses, áreas, sinergias, oportunidades), la cual retoma los resultados de las acciones 1, 2, 3 y 4 y se califican teniendo en cuenta criterios de eficacia, factibilidad, prospectiva e impacto, de acuerdo con la ponderación en la acción 5.

Con la información recopilada y el análisis de los hallazgos de cada acción, se efectuó una triangulación de la información con el propósito de definir aspectos como: denominación del grupo y de las líneas de investigación, fundamentación de las líneas de investigación, alcance, propósitos, metas y áreas de oportunidad para la generación de nuevo conocimiento y desarrollos tecnológicos y de innovación.

Se identificó la necesidad de incluir como resultado de las acciones 1, 2, 3 y 4 un listado orientaciones IASO (Intereses, áreas, sinergias, oportunidades). Cabe mencionar, que estas deberán reconocerse desde dos puntos de vista: 1) aquellas que han posicionado otros grupos de investigación, 2) aquellas que han sido poco exploradas, lo que representa una oportunidad en la generación de nuevo conocimiento.

La implementación de la metodología propuesta, mostró que las 5 acciones para la toma de decisión en Investigación, Desarrollo e Innovación I+D+i [11] por separado arrojan información relevante; sin embargo, para garantizar un juicio imparcial frente a las mismas, es necesario establecer un criterio de análisis cuantitativo que muestre elementos clave, tanto de los datos reportados por cada una de las acciones como de la triangulación de las 4 primeras acciones, para la toma de decisión final.

3.2 Metodología IASO

3.2.1 Caracterización de la tradición e intereses investigativos de los grupos

- *Planeación estratégica de la organización.* Está relacionada con la orientación hacia la investigación y los grupos de investigación. Implica la revisión de las políticas y estrategias de la organización. Para ello, se deberá revisar la política de investigación y el plan de trabajo. En caso de que la organización o el grupo de investigación no cuente con esta información podrá indagarse con la alta dirección y con el líder(es) del grupo a través de una conversación dirigida a indagar el compromiso y la intención de la dirección en la orientación de la investigación. Para la organización de esta información se recomienda utilizar como método una entrevista semi-estructurada. Para aquellos casos en los que la metodología quiera aplicarse a varios en paralelo, de una misma organización o de un grupo empresarial puede aplicarse la estrategia de grupos focales, dado que permite optimizar tiempos en la

recolección de la información, además estudios han demostrado su utilidad como lo refleja Rosenthal [12] en su investigación.

- *Caracterización del grupo.* Esta incluye el análisis de la tradición del grupo a partir del estudio de los objetivos definidos, las líneas establecidas por el grupo, los perfiles de los investigadores detallando su formación, participación en proyectos de desarrollo tecnológico e innovación, la misión, las redes, la antigüedad en años y las fuentes de acceso a la información, y los mecanismos de comunicación y divulgación. De acuerdo con los estudios de Vendrell y Ortín [13] y García-Padilla et al. [8] para definir los campos y líneas de investigación se requiere consultar las agendas nacionales y analizar la producción asociada a revistas especializadas o base de datos en particular.

Para consultar la información registrada se deberá ingresar al sistema de información definido por el ente regulador de la investigación en el país (para el caso de Colombia el GrupLAC de MINCIENCIAS). Así como los resultados de la última medición de grupos de investigación en los cuales se analizarán los indicadores de nuevo conocimiento, desarrollo tecnológico e innovación, apropiación social del conocimiento y formación de recurso humano.

Asimismo, Ortega [14] indica que el análisis de los trabajos son una buena fuente para la definición de líneas de investigación. Atendiendo a esta recomendación en la metodología se propone analizar bibliométricamente los trabajos de grado de los programas académicos asociados al grupo de investigación objeto de análisis y además es recomendable, realizar un análisis de contenido de los documentos producidos por el grupo y de documentos producidos por terceros sobre el grupo. Para facilitar el proceso se pueden utilizar categorías deductivas y discretas [15] y clasificar el contenido de los documentos en ellas, para lo cual se propone: A. Planeación estratégica del grupo y su relación con los grupos y líneas de investigación, que incluye sus estrategias y productos de divulgación, así como sus objetivos. B. Caracterización del grupo, que incluye su composición, normas internas, trabajo intergrupar y líneas de investigación. C. Caracterización de la producción, que se relaciona estrechamente con los medios de divulgación utilizados y D. Intereses de los grupos, que integra los eventos significativos del grupo, el perfil de los investigadores tanto como académicos y profesionales, y sus trayectorias. De preferencia se deberían hacer análisis longitudinales, pero esto depende de la adecuada curación de los documentos.

- *Aportes identificados del grupo de investigación al logro de los objetivos organizacionales.* Se identificarán los proyectos de investigación que han derivado nuevos productos o servicios para la organización o que han dado respuesta a problemáticas sociales (visto desde los indicadores de responsabilidad social o proyección según corresponda a la organización). Se debe describir el aporte tangible (productos o servicios generados).

Además de la caracterización del grupo y la identificación de intereses organizacionales, el resultado esperado de esta acción es la identificación de divergencias y coincidencias entre la producción y la declaración, que serán el insumo para un análisis de las brechas detectadas, entre las políticas y objetivos de investigación, la planeación estratégica de la organización, los productos declarados por el grupo y la producción real del mismo.

Otro resultado esperado, es la formalización del alcance del proyecto o resultado final de la aplicación de la presente metodología. Este alcance, si bien se refiere a la definición o fortalecimiento de las líneas de investigación, debe precisar según lo recopilado, el enfoque preliminar de los temas de las líneas con el fin de facilitar y focalizar la aplicación de las acciones posteriores de la metodología. Esta formalización puede ser materializada a través de un acta de inicio o de compromisos, firmada entre las partes; el alcance puede ser ajustado de acuerdo con el resultado de las demás etapas.

Una vez realizado el análisis de cada uno de estos tres puntos, la información obtenida será triangulada de tal modo que logre precisar, junto con el líder del grupo, las expectativas y objetivos perseguidos por el grupo frente a la implementación de esta metodología.

3.2.2 Identificación y análisis de tendencias de potenciales grupos de investigación colaboradores o aliados

Se partirá de la revisión de los grupos de investigación reconocidos por el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología local o el organismo que regule, administre o gestione ciencia y tecnología, así como de la indagación de grupos de investigación derivados de la academia, centros de investigación o constituidos por otro tipo de organizaciones que están relacionados con el objeto misional de la organización interesada y que aunque no estén reconocidos en el marco del sistema de Ciencia y tecnología, por su actividad merecen ser considerados como punto de referencia para efectos del análisis de tendencias emergentes o decadentes.

Como bien lo refieren Arguimbau y otros [16], Benítez y Benavides [17] y Michán [2], en sus estudios el análisis de la producción investigativa permite identificar áreas de investigación y posibles aliados y redes de trabajo. Es por ello, que esta etapa metodológica tiene como fin la identificación de posibles pares o competidores del grupo de

investigación interesado. Se usará el criterio de selección de grupos por áreas de conocimiento. Asimismo, se analizarán los centros de investigación reconocidos por MINCIENCIAS para el caso de Colombia.

Una vez identificados los grupos de investigación, se efectuará un análisis descriptivo, para lo cual se considerará el perfil de los grupos pares o competidores y se identificarán los siguientes indicadores y categorías:

1. Número de grupos de investigación con igual denominación, número de grupos de investigación con denominación similar. Identificación de 3 a 5 grupos con intereses comunes de acuerdo con la I) Afinidad temática y la II) Posibilidad de redes colaborativas de trabajo investigativo.
2. Número de líneas de investigación con las que cuentan los grupos de investigación seleccionados en el ítem a y denominación de las líneas de investigación.
3. Número de proyectos de investigación y análisis de los temas centrales de los proyectos de investigación correspondiente a los grupos de interés, definidos a partir de los resultados del ítem b.

El resultado esperado de esta acción es la identificación de la tendencia de las líneas de investigación y de los temas que trabajan los potenciales grupos de investigación colaboradores o aliados.

3.2.3 Identificación y análisis de tendencias de publicaciones nacionales e internacionales

La publicación, hace referencia a información divulgada en fuentes estructuradas y no estructuradas en el área de conocimiento o temática en la cual se circunscribe el grupo, ya sea cualitativa o cuantitativa. Las fuentes estructuradas son aquellos medios formales como revistas cuyo repositorio son las bases de datos académicas que contienen información estructurada, por su parte, las fuentes no estructuradas son aquellos medios no formales, como por ejemplo medios de comunicación; que van desde los tradicionales a los digitales, hasta los medios sociales [18]. En algunos contextos al primer caso se le denomina literatura blanca y al segundo literatura gris [19].

Los resultados esperados de la identificación y análisis de publicaciones son la caracterización del área de interés del grupo, que se hace a partir de la identificación de tendencias provenientes de resultados publicados de ciencia y tecnología, y su comportamiento de búsqueda en las fuentes no estructuradas a partir de un objetivo de búsqueda claro y un público objetivo definido, que deben corresponder a las conclusiones obtenidas de la etapa 1 de la presente metodología.

El alcance de la pesquisa, es decir si es nacional, regional o global, por ejemplo, debe estar sujeto a las necesidades particulares del grupo, de esta manera, si su interés es competir al nivel nacional con otros grupos, no es necesario hacer una revisión extensa de tendencias globales o regionales, más que para establecer puntos de referencia y un estado del arte de la temática. Siguiendo esta idea, para algunos grupos puede ser más relevante enfocarse bien en las fuentes estructuradas o bien en las no estructuradas, de manera que en algunos casos puede prescindirse o dar menor relevancia a una de estas dos. Adicionalmente se debe considerar el acompañamiento de expertos en la temática, en caso de que quien ejecute la metodología, no tenga conocimiento en la materia (temática). Para la metodología ágil propuesta se establecen 5 pasos: 1) Selección de fuentes de información, 2) Selección de datos, 3) Análisis de datos, 4) Visualización de resultados, y 5) Consolidación de la información.

La identificación y análisis de tendencias de publicaciones provenientes de información estructurada de alcance nacional o internacional, se lleva a cabo a través de las bases de datos académicas o de patentes. Para el primer caso, se hará uso de los indicadores cuantitativos que proporcionan las bases de datos a partir de búsquedas específicas, lo que implica asumir el error de clasificación de los datos por parte de estas, que en muchos casos procede de la revisión editorial de las revistas que hacen parte de la base. Para el segundo caso, cuando las bases no proporcionan indicadores de forma automática, pero su información es estructurada, el análisis considera la clasificación por defecto de los datos en categorías.

- *Selección de fuentes de información.* Las bases de datos académicas son por excelencia la fuente de información estructurada más apropiada para la consecución de datos publicados provenientes de la ciencia y la tecnología. La definición del número y tipo de fuente dependerá del objetivo de búsqueda definido en la etapa 1 de la presente metodología, el área del conocimiento en la cual se circunscribe la búsqueda, la calidad de los resultados, los permisos de acceso a las fuentes de información. Se deben seleccionar por lo menos dos fuentes de información.

Algunas de las bases de datos con acceso abierto para la consulta de indicadores cuantitativos son: Scielo [<http://www.scielo.org/php/index.php>] (con énfasis en Latinoamérica), Science Direct [<http://www.sciencedirect.com/>], Springerlink [<http://link.springer.com/>], IEEE Xplore [<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/guesthome.jsp>], para la consulta de patentes en Colombia [<http://www.sic.gov.co/drupal/base-de-datos>]. Para patentes a nivel internacional Espacenet [<https://worldwide.espacenet.com/>] y la WIPO [<https://patentscope.wipo.int/search/en/structuredSearch.jsf>]

Es de aclarar, que algunas instituciones ponen a disposición del público en general informes de revisión de información estructurada de la ciencia y tecnología, por ejemplo, la WIPO realiza informes de análisis de la actividad de patentamiento [<http://www.wipo.int/research/en/search/>] y la fundación para el conocimiento madri+d [<http://www.madrimas.org/informacionIDI/biblioteca/Publicacion/Vigilancia-tecnologica/default.asp>], entre otras.

Se debe tener en cuenta que algunas bases de datos no cuentan con el servicio de indicadores cuantitativos y otras requieren de afiliación paga para la consulta, por lo que se puede recurrir a la solicitud de un periodo de prueba gratuito o el contacto con entidades que proporcionen acceso a través de convenio, como por ejemplo las asociaciones de egresados de universidades o bibliotecas públicas. La información que aparece indexada en bases de datos científicas o patentes, por norma aparece registrada y bien curada, lo cual permite realizar análisis estadísticos y cuantitativos, sin embargo, en el espacio digital de internet existen otras fuentes de información que no obedecen a estos criterios, ni se presentan de manera ordenada, por lo cual el primer paso es buscar las fuentes importantes y ordenarlas, para luego darles sentido.

Debido a que la fuente principal en algunos casos es internet, la búsqueda de información desestructurada debe contemplar medios sociales, así como ediciones digitales de medios, u otros sitios web que sean identificados como relevantes. Además del problema de confiabilidad de la información en la web, otro de los problemas importantes que debe resolverse está alineado con la pregunta de ¿cómo permanecer cualitativo en el mundo digital?[20], esta pregunta es importante puesto que en la denominada sociedad de la Información, los volúmenes de datos han crecido exponencialmente [21], y cada vez más gana terreno la ciencia de datos y el big data, relegando la investigación cualitativa, debido a que por un lado es difícil lidiar con los tamaños de los datos que se producen y segundo, el procesamiento de esos datos se torna dispendioso de administrar[22]. Nuestra respuesta, como mostraremos es que la visualización de datos es clave para este objetivo.

El análisis de información no estructurada pretende hacer las búsquedas tal como las haría un determinado público objetivo, según sean las necesidades del caso, podría necesitarse un grupo de personas con perfil gerencial, o perfil académico, uno en el que tengan en común asistir a un particular evento o incluso ser parte de una comunidad de sentido [23] y delimitarlo en profundidad, porque estos públicos objetivos suelen buscar fuentes de información muy específicas y especializadas.

El público objetivo más general que puede definirse y desde el cual se recomienda hacer las búsquedas, es el de personas, mayores de edad, de sexo indeterminado, de las principales ciudades de la región de interés, ya sea ciudad, país o continente. Una forma rápida de entender el comportamiento de los términos de búsqueda en web es realizar pesquisas en Google Trends, para identificar tendencias en las búsquedas, las palabras clave deben ser predefinidas desde el paso anterior, pero deben ser corroboradas en este paso, igualmente deben considerar variaciones lexicales de región en región (pancho o perro caliente, en los casos de Argentina y Colombia), idiomas y sintaxis (por ejemplo, gestión o gestion), para los mismos términos de búsqueda [24].

- *Selección de datos.* Para la selección de los datos, se recurre a términos de búsqueda basados en la experiencia que se tenga del tema, considerando el relacionamiento de los términos a través de conectores booleanos, la inclusión de filtros y el uso de lengua inglesa para el caso de búsquedas internacionales, como idioma generalizado de la ciencia y la tecnología y del idioma local para el caso de búsquedas regionales; de forma complementaria se recomienda revisar el listado de términos oficiales de las bases de datos por área de conocimiento, puede utilizarse por ejemplo MeSH, DECS, Thesaurus u otros repositorios para obtener un alto componente de acierto en el vocabulario de acuerdo a la estandarización que estas proporcionan.

La definición del número y tipo de registros que conformen el corpus de la búsqueda dependerá de la precisión que se requiera y de la capacidad de las herramientas disponibles para el procesamiento de los datos. Una vez se logre obtener la ecuación de búsqueda más apropiada para la consecución del objetivo planteado en la etapa 1 de la metodología, se deben exportar los indicadores a la herramienta seleccionada para el procesamiento y análisis de los datos. Excel® constituye una alternativa cómoda para dichos propósitos.

El primer paso es delimitar el conjunto de datos, el conjunto de datos no estructurado se compone de sitios web, medios tradicionales o digitales, medios sociales (redes sociales como Facebook o Twitter) y literatura gris (como páginas de información general, comercial o educativas) [25]. La elección de los sitios donde se buscará se hace a partir de la definición del público objetivo, el cual se definió en la sección anterior, posteriormente se hace la búsqueda en los sitios de mayor penetración y afinidad para el público objetivo, que se puede determinar consultando fuentes como Comscore, Estudio Colombiano de Internet, Euromonitor o Google Trends, utilizando las palabras clave de la búsqueda.

Todo el proceso se trata de recopilar los fragmentos de información disponibles sobre un tema y colocarlos de manera coherente, usualmente se encuentran una gran cantidad de autores, que pueden ser categorizados en tipo

de autor debido a que se ha encontrado una tendencia hacia la homogeneidad, por ejemplo, en el caso de diarios como el NYT, TWSJ, o el Huffpost, se pueden clasificar en la categoría general denominada diarios [26].

- *Análisis de datos.* Los indicadores cuantitativos disponibles, aunque varían de acuerdo con la base de datos consultada, en su mayoría proporcionan datos de publicación relacionados con: año, revista, tema y tipo de contenido, los cuales para un análisis rápido pueden ser suficientes. Sin embargo, el alcance y profundidad de los análisis dependen del objetivo establecido por la empresa y pueden incluir análisis de contenido estadístico descriptivo, conteo de palabras (frecuencia) o identificación de tendencias, según convenga con el caso [27], aspecto que podría determinar el uso de una metodología más compleja [28].

Para realizar una exploración rápida y de bajo costo del conjunto de datos, se puede acudir a la visualización de datos [29], particularmente la producción de nubes de palabras, las cuales grafican las palabras que tienen mayor frecuencia de aparición en el texto, con mayor tamaño en la visualización. Igualmente deben eliminar palabras vacías, se recomienda usar herramientas como wordle.net.

Una vez identificados los términos más relevantes, el análisis de contenido debería centrarse exclusivamente en esos términos y dejar de lado los menos relevantes. El análisis de contenido consiste en entender el significado de las palabras clave, cómo se relacionan con otras palabras, y por último entender cuál es la intención del autor al enunciar esas palabras, por ejemplo, entender qué quiere decir la palabra salud para la OMS. El análisis puede hacerse manualmente, tomando notas en un procesador de palabra o acudiendo a software gratuito, como por ejemplo LibreQDA, CATMA, teniendo en cuenta criterios muestrales cualitativos, como la saturación que es cuando la investigación no arroja nueva información sobre una categoría o tema [30].

- *Visualización de resultados.* La visualización de datos de fuentes no estructuradas tiene relación directa con el análisis de datos de la sección inmediatamente anterior. Los resultados deberían presentarse acudiendo nuevamente a nubes de palabras, aunque se sugiere que estas presenten información limpia y depurada de palabras poco relevantes en términos de frecuencia y vacías. Los softwares de análisis de contenido como LibreQDA y CATMA, arrojan tablas y gráficas básicas apoyadas en estadística descriptiva, que pueden utilizarse para presentación de datos y resultados [31]. Para el caso de la visualización de fuentes estructuradas, las tablas de frecuencia y matrices (que incluyen dos categorías de análisis), se pueden derivar de aplicaciones de procesamiento como Excel®.
- *Consolidación de la información.* La consolidación de la información es un ejercicio simultáneo de validación y triangulación, que se debe hacer a partir de los resultados y no de las fuentes o los procedimientos, se espera que este proceso permita hacer una discusión en la que se contrasten resultados comparables, pero que por la naturaleza de las fuentes permitan hacer conclusiones sobre temas divergentes y no necesariamente presentes en todas las fuentes. Una vez los resultados estén consolidados debe triangularse la información, esto consiste en listar los resultados de cada fuente y revisar cuáles son compatibles y en cuáles hay diferencias, una diferencia en este caso no significa que la información esté errada, sino que puede obedecer a que las diferentes fuentes presentan distinta información, esto abre espacios de discusión y amplía la visión sobre el tema. Por último, la validación se cristaliza como una discusión sobre los resultados convergentes y divergentes, que puede llevar a conclusiones, nuevas preguntas e hipótesis [32].

3.2.4 Análisis de contexto organizacional, local e internacional

En cuanto al contexto organizacional, contenido en la acción 4, es importante precisar que la revisión y recopilación de la información debe permitir identificar los focos o temas específicos o sectores a los que la organización decide apostarle para su crecimiento, y que deben ser apoyados por los grupos de investigación. Como bien se precisó en la acción 1, usualmente los hallazgos documentales en cuanto a la planeación estratégica son escasos.

Cuanto más específica y precisa sea esta información, de mayor valor es para el estudio, de lo contrario es el mismo ejercicio de la metodología de fortalecimiento de los grupos de investigación, el que podría (aunque no es su fin por sí mismo) con base en sus resultados obtenidos, proponer a la organización un enfoque específico de innovación y de desarrollo para ser validado e integrado al marco estratégico de la organización el cual sería totalmente correspondiente con las líneas de investigación y desarrollo que se definan, garantizando un aporte real de los grupos al logro de los propósitos de la entidad.

Obtener el compromiso de la alta dirección de la organización en el desarrollo de este ejercicio es fundamental, por lo cual se recomienda incluir como parte de la metodología la sensibilización inicial a las partes interesadas clave sobre el proceso a desarrollar para lograr su participación, la asignación oportuna de recursos y su sensibilización frente a la importancia y aporte a la organización de los grupos de investigación.

En el caso de organizaciones de carácter empresarial, no se cuenta muchas veces con el conocimiento sobre herramientas de búsqueda o disponibilidad de bases de datos, por lo que es importante generar lazos con entidades

u otros grupos de investigación que faciliten la consecución de la información. En este sentido, desde el comienzo debe ser claro que la aplicación de la metodología requiere de la asignación de recursos asociados a tiempo, consecución y acceso a información especializada.

Frente a los resultados esperados de esta fase, si bien la metodología indica que el resultado esperado de la acción de análisis de contexto es entender la dinámica del entorno y su influencia en la organización, es decir las oportunidades y amenazas que este representa, así como las fortalezas y debilidades organizacionales, se debe entender que esto se refiere a un alcance tecnológico y de innovación y no de frentes no pertinentes en relación con el objetivo de la metodología. Para el contexto internacional se recomienda consultar organismos que financian o patrocinan áreas de interés mundial o para la región, dentro de los que se encuentran: BID, ONU, ODM-ONU, OIM, UNESCO, CEPAL, OCHA, CE, WHO, OCDE, OMC, USAID, GIZ, BM, CYTED, AECID, OEI, IESALC, OEA, CAN, Convenio Andrés Bello, ISO, ILO, UNICEF, entre otros.

En importante establecer categorías por temáticas de interés y en orden descendente teniendo en cuenta las frecuencias de aparición en los organismos que participan; algunas de estas categorías pueden ser: Salud, Industria, Comercio y Turismo, Desarrollo Sostenible, Educación, Gobernanza y Democracia, Crisis y Conflictos, Medio Ambiente, Desarrollo Económico, Seguridad Alimentaria, TIC, Asuntos humanitarios, Ciencia y Tecnología, Diversidad Cultural e Interculturalidad, Derechos Humanos, Afrodescendientes, Género, Energía, Niñez, Transporte, Agua, Gestión del riesgo, Cooperación Internacional y Propiedad intelectual.

3.2.5 Análisis de alineación estratégica y propuesta de líneas de investigación

La definición de líneas de investigación es el resultado del análisis integral de los resultados de las acciones anteriormente planteadas. En este marco, los resultados de las acciones 1, 2, 3 y 4 proporcionan una entrada fundamental para la identificación de las orientaciones potenciales que pueden tener las líneas de investigación. Estas orientaciones atienden a 4 aspectos, a saber:

- Acción 1: Permite listar los intereses (I) del grupo de investigación o de la organización en materia de la investigación.
- Acción 2: Permite listar las áreas (A) de investigación trabajadas por potenciales grupos de investigación colaboradores o aliados.
- Acción 3: Permite listar las Sinergias (S) de los sectores público-privados.
- Acción 4: Permite listar las oportunidades (O) para el desarrollo de la investigación vistas desde el contexto global y organizacional.

A partir del análisis efectuado, es conveniente organizar los resultados en una matriz en cuyas filas se registren los resultados de las acciones 1, 2, 3 y 4 y en las orientaciones IASO, un ejemplo se presenta en la Tabla 2. Es de aclarar que el total de las filas para cada una de las columnas dependerá de los hallazgos.

Tabla 2. Ejemplo de Orientaciones IASO para un grupo de investigación

Intereses	Áreas	Sinergias	Oportunidades
Acción 1	Acción 2	Acción 3	Acción 4
Gestión de calidad	Gestión en SYSO	Medio ambiente	Salud
Responsabilidad social	Gestión ambiental	Sistemas de decisión soportada	Industria, Comercio y Turismo
Gestión pública	Gestión del conocimiento	Gestión industrial y del conocimiento	Desarrollo Sostenible
	Gestión financiera	Análisis de costos	Educación
	Gestión integrada/integral	Sistemas de gestión de calidad	Gobernanza y Democracia
	Gestión pública	Documentación	Crisis y Conflictos
	Desarrollo sostenible	Servicios de salud	Medio Ambiente
		Control, aseguramiento y mejoramiento de la calidad	Desarrollo Económico
		Gestión pública	Seguridad Alimentaria
			TIC

El resultado de esta matriz es un listado de *Orientaciones IASO* propuestas que posteriormente se deben cuantificar a partir de criterios para tamizarlas y seleccionarlas objetivamente para definir las líneas de investigación, dichos criterios consideran eficacia, factibilidad, prospectiva e impacto, los cuales se describen más adelante.

La información de la tabla 2, se propone desarrollar mediante un taller con personas clave de la organización y de ser posible partes interesadas [33], el cual permitirá, apropiar y posicionar la importancia del grupo de investigación en la organización y su entorno (representantes de la alta dirección, investigadores, expertos en las temáticas, usuarios potenciales de los productos de investigación, etc). Igualmente, el ejercicio valida la confiabilidad de los resultados y complementa la información sobre lo que debería hacer el grupo a mediano y largo plazo, con el ánimo de identificar focos de investigación de interés colectivos, pero alineados con las necesidades organizacionales en un contexto externo interiorizado.

Esta propuesta metodológica implica un cambio desde un punto de vista del conocimiento como una cosa que se puede transferir a la visualización del conocimiento como un proceso de relación, que implica la negociación de significados entre los socios. La experiencia de Centros de investigación en Australia muestra que en gran medida el éxito de estos radica en la capacidad de equilibrar la oferta de los productos y servicios de investigación, con la demanda de los usuarios potenciales de la misma, logrando además otros productos en educación y redes de colaboración con impacto social [34].

Tomando las palabras de [35], el grupo en este caso no es un mero receptor de capacitación, sino que también se vuelve productor de reflexión acerca del problema propuesto, por lo que se propone la técnica abajo descrita, que permite a partir del análisis de la alineación estratégica tamizar y priorizar las orientaciones para la acción, a saber:

- Explicación a los participantes del objetivo del ejercicio y las actividades a realizar.
- Presentación por parte de los encargados de la aplicación de la metodología de las actividades previas realizadas y los resultados obtenidos en las acciones 1, 2, 3 y 4, dejando claramente establecido el listado o inventario de orientaciones de investigación potencial identificadas o propuestas.
- Indagar, con base en opiniones informadas, sobre posibles ideas acerca de temas no considerados y validar la forma más pertinente de agrupar y presentar los temas.
- Con base en las *Orientaciones IASO* identificadas construir una matriz para calificación final de los expertos, como se propone a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Criterios para tamizar y priorizar las orientaciones IASO

	Eficacia (A)	Factibilidad (B)	Prospectiva (C)	Impacto (D)	Calificación global
Listado propuesto de Orientaciones IASO	0.5=No eficaz 1.5=Eficaz	Pertinencia (0-1) Recursos económicos (0-1) Otros recursos (0-1) Legalidad (0-1) Aceptabilidad (0-1)	Σ Factibilidad (B)	0.5=Bajo 1=Medio 1.5=Alto	0.5=Bajo 1=Medio 1.5=Alto A x B x C x D
1					
2					
...					

- *Eficacia (A)*: Se debe evaluar que la orientación cumpla con el objetivo estratégico de la organización. Para el ejemplo analizado el objetivo es: Formar profesionales con una visión gerencial que no solamente se enfoca en los campos de la productividad y la eficiencia, sino también en la calidad de los bienes y servicios, con un claro direccionamiento hacia la Responsabilidad Social Empresarial. En este caso, en cada una de las orientaciones IASO se responderá con un no es eficaz que se le asignará un valor de 0.5 o si es eficaz al que le corresponderá 1,5.
- *Factibilidad (B)*: Considera cinco aspectos, entre ellos, la pertinencia de la acción, los recursos económicos con los que se cuenta para impulsar el desarrollo de la investigación, otros recursos, la legalidad y la aceptabilidad tanto en el contexto interno como en el externo. En este caso, en cada una de las *Orientaciones IASO* se responderá con un no y le corresponderá el valor 0 ó con un sí que se le asignará un valor de 1. Posteriormente, se efectuará una sumatoria de los cinco aspectos enunciados.
- *Prospectiva (C)*: Se considera una orientación con un potencial de desarrollo futuro importante. En cada una de las *Orientaciones IASO* se responderá prospectiva baja con un valor de 0.5, prospectiva media con un valor de 1.0 o prospectiva alta a la que le corresponderá el valor 1.5.
- *Impacto (I)*: El impacto se evaluará considerando la producción que se podría obtener de las investigaciones de las *Orientaciones IASO* propuestas, a saber: generación de nuevo conocimiento, apropiación social del conocimiento, desarrollo tecnológico e innovación y formación del recurso humano en ciencia y tecnología. En cada una de las *Orientaciones IASO* se responderá con impacto bajo que se le asignará un valor de 0.5, impacto medio un valor de 1.0 o impacto alto al que le corresponderá el valor 1.5.
- *Calificación global*: Se lleva a cabo a través de la fórmula A x B x C x D. Como resultado final para la declaración de las líneas de investigación, se considerarán las orientaciones con mayor ponderación.

En relación con el ejemplo de aplicación, los resultados de este tamizaje y priorización se presentan en la Tabla 4. En la cual se puede apreciar en color verde las dimensiones con calificación mayor, destacándose desarrollo sostenible, responsabilidad social, gestión ambiental, gestión en SySO, gestión del conocimiento y gestión de la calidad.

Finalmente, de acuerdo con los hallazgos de la acción 2, se recomienda entre 4 y 6 líneas de investigación por cada grupo de investigación; no obstante, esto también dependerá de la capacidad del grupo en cuanto al número de investigadores disponibles.

Tabla 4. Resultados del tamizaje y priorización de las orientaciones IASO para el grupo ejemplo

Listado final de Orientaciones IASO	Eficacia (A)		Factibilidad (B)				Σ Factibilidad (B)	Prospec. (C)	Impacto (D)	Global A x B x C x D
	0.5=No eficaz 1.5=Eficaz	Pertinencia (0-1)	Recursos económicos (0-1)	Otros recursos (0-1)	Legalidad (0-1)	Aceptabilidad (0-1)		0.5=Baja 1=Media 1.5=Alta	0.5=Bajo 1=Medio 1.5=Alto	
Desarrollo sostenible	1,5	1,0	1,0	0,8	1,0	1,0	4,8	1,5	1,5	16,0
Responsabilidad social	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5,0	1,4	1,4	14,2
Gestión ambiental	1,5	1,0	0,8	0,8	1,0	1,0	4,5	1,5	1,4	13,9
Gestión en SYSO	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5,0	1,4	1,3	12,9
Gestión del conocimiento	1,5	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	4,8	1,3	1,4	12,2
Gestión de calidad	1,5	1	1	1	1	1	5	1,1	1	8,4
Gestión integrada/integral	1,3	1,0	0,8	0,8	1,0	1,0	4,5	1,3	1,1	7,9
Gestión del riesgo	1,3	1,0	0,8	0,5	1,0	1,0	4,3	1,1	1,3	7,5
Ciencia y Tecnología	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,8	4,3	1,4	1,3	7,3
Educación	1,0	1,0	1,0	0,8	1,0	1,0	4,8	1,3	1,1	6,7
TIC	1,0	1,0	0,5	0,8	1,0	1,0	4,3	1,3	1,3	6,6
Servicios de salud	1,3	0,8	0,8	0,3	1,0	1,0	3,8	1,0	1,4	6,4
Control, aseguramiento y mejoramiento de la calidad	1,0	1,0	1,0	0,8	1,0	1,0	4,8	1,1	1,1	6,0
Gestión pública	1,3	1,0	1,0	0,8	1,0	1,0	4,8	1,1	0,9	5,8
Agua	1,0	0,8	0,8	0,5	1,0	0,8	3,8	1,1	1,1	4,7
Sistemas de decisión soportada	1,3	0,8	0,5	0,5	1,0	0,8	3,5	0,9	1,1	4,3
Energía	1,0	0,5	0,5	0,3	1,0	0,5	2,8	0,9	1,3	3,0
Gobernanza y Democracia	0,8	0,8	0,5	0,3	1,0	0,8	3,3	0,8	1,1	2,1
Cooperación Internacional	0,5	1,0	0,5	0,3	1,0	0,8	3,5	1,1	1,0	2,0

4. CONCLUSIONES

La metodología IASO creada para la definición y fortalecimiento de líneas de investigación y dirigida tanto a grupos de investigación académicos como empresariales, tras su validación de contenido y de constructo mantiene las cinco acciones propuestas teóricamente; sin embargo, se vio la necesidad de ajustar la denominación de la acción 2, denominada inicialmente *Identificación y análisis de tendencias emergentes y decadentes de otros grupos y líneas de investigación nacionales* quedando en la versión final como *identificación y análisis de tendencias de potenciales grupos de investigación colaboradores o aliados*. Además, se ajustó el contenido de las acciones 4 y 5.

Es de resaltar que, se mantuvo la flexibilidad de la metodología, dado que las primeras cuatro acciones pueden desarrollarse de forma paralela y una vez concluido el análisis de cada una de ellas se concreta la acción 5. *Análisis de alineación estratégica y propuesta de líneas de investigación*.

De igual manera el propósito con la cual se gestó se mantuvo y fue avalado tanto por los expertos en la fase de validación de contenido como en la fase de validez de constructo. En síntesis, esta propuesta metodológica se considera como un ciclo que cada grupo de investigación aplique periódicamente para garantizar su aporte al logro de los objetivos organizacionales, para que dinamice permanentemente su quehacer de acuerdo con las tendencias actuales y escenarios futuros.

Se pudo concluir tras la aplicación de la metodología, que la búsqueda no estructurada cubre un rango específico (aproximadamente entre 10 y 15 años, por lo tanto, se toma con un criterio de referencia para la búsqueda y recuperación de este tipo de información), mientras que estas fuentes del componente estructurado muestran una transformación cronológica del desarrollo del conocimiento en la temática abordada.

Este último punto explica por qué la información que aparece en fuentes no estructuradas es deficiente. Sin embargo, se pudo evidenciar coherencia y alineación entre los resultados del componente de información no estructurada con el mapa tecnológico producto del análisis de la información estructurada. Esta coherencia se evidenció en la aproximación de redes y en la visualización de los datos, siendo este uno de los grandes puntos de convergencia de la metodología propuesta.

Finalmente, para los grupos de investigación analizados se precisó su denominación y se establecieron las líneas de investigación considerando los intereses investigativos de los programas académicos que respaldan, las áreas de investigación, las sinergias establecidas y por consolidar con los sectores público-privados, así como las oportunidades para el desarrollo de la investigación vistas desde el contexto global y organizacional.

REFERENCIAS

- [1] Barham, H. y Daim, T. (2020). The use of readiness assessment for big data projects. *Sustainable Cities and So.*, 60, 10-22.
- [2] Michán, L. (2011). Cienciometría información e informática en ciencias biológicas: Enfoque interdisciplinario para estudiar interdisciplinas. *Ludus Vitalis*, 19(35), 239-243.
- [3] Gorbea, S. (2016). Una nueva perspectiva teórica de la bibliometría basada en su dimensión histórica y sus referentes temporales. *Investigación Bibliotecológica: Archivonomía, Bibliotecología e Información*, 30(70), 11-16.
- [4] Boyack, K. y Klavans, R. (2014). Including cited non-source items in a large-scale map of science: What difference does it make? *Journal of Informetrics*, 8(3), 569-580.
- [5] García, J. y López, M. (2020). Revisiones sistemáticas con metaanálisis de ensayos clínicos: ¿es evidencia suficiente? *Cirugía Española*, 98(1), 4-8.
- [6] Jamshidi, L. et al. (2018). Methodological quality of meta-analyses of single-case experimental studies. *Research in Developmental Disabilities*, 79, 97-115.
- [7] Holmes, R. et al. (2018). International strategy and business groups: A review and future research agenda. *Journal of World Business*, 53(2), 134-150.
- [8] García, C. et al. (2017). Techno-economic and energetic assessment of hydrogen production through gasification in the Colombian context: Coffee Cut-Stems case. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(9), 5849-5864.
- [9] Rodríguez, Y. y Luque, A. (2019). Metodologías para el fortalecimiento de líneas en grupos de investigación académicos o empresariales. *Revista Lasallista de Investigación*, 16(2), 142-159.
- [10] Rodríguez, Y. y Molano, J. (2018). Estrategias para la mejora de la gestión de la seguridad y salud en el trabajo frente a las formas de vinculación en un consorcio empresarial. En *Reflexiones, metodologías y experiencias en salud y seguridad en el trabajo en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- [11] Rodríguez, Y. et al. (2018). 5 acciones para la toma de decisión en investigación, Desarrollo e innovación I+D+i. *Revista EAN*, 85, 85-104.
- [12] Rosenthal, M. (2016). Qualitative research methods: Why, when, and how to conduct interviews and focus groups in pharmacy research. *Currents in Pharmacy Teaching and Learning*, 8(4), 509-516.
- [13] Vendrell, F. y Ortín, P. (2008). OTRI: Agenda de investigación. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 14(3), 67-78.
- [14] Ortega, E. (2010). La investigación en marketing a través de las tesis doctorales españolas. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 16(1), 127-147.
- [15] Marvasti, A. (2004). *Qualitative research in sociology: An introduction*. SAGE.
- [16] Arguimbau, L., Fuentes, E. y Gallifa, M. (2013). Una década de investigación documental sobre cienciometría en España: Análisis de los artículos de la base de datos ISOC (2000-2009). *Revista Española de Documentación Científica*, 36(2), 1-11.
- [17] Benítez, N. y Benavides, C. (2012). Investigación en innovación tecnológica: Un estudio bibliométrico de *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa*. *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa*, 21(2), 157-168.
- [18] Corcoglioniti, F. et al. (2015). The KnowledgeStore: A Storage Framework for Interlinking Unstructured and Structured Knowledge. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, 11(2), 1-35.
- [19] Harlan, M. (2010). Black and White Literature, Grey Scholars. *Archaeologies*, 6(2), 270-288.
- [20] Boyd, D. y Crawford, K. (2012). Critical Questions for Big Data. *Information, Communication & Society*, 15(2), 662-679.
- [21] Castells, M. (1998). *La era de la información: Economía, sociedad y cultura*. Alianza.
- [22] Gold, M. (2012). *Debates in the Digital Humanities*. University of Minnesota Press.
- [23] Galehbakhtiari, S. y Hasangholi, T. (2015). A hermeneutic phenomenological study of online community participation. *Computers in Human Behavior*, 48, 637-643.
- [24] Manovich, L. (2009). The Practice of Everyday (Media) Life: From Mass Consumption to Mass Cultural Production? *Critical Inquiry*, 35(2), 319-331.

- [25] Heuser, T. y Le-Khac, J. (2011). Learning to Read Data: Bringing out the Humanistic in the Digital Humanities. *Victorian Studies*, 54(1), 79.
- [26] Madianou, M. y Miller, D. (2013). Polymedia: Towards a new theory of digital media in interpersonal communication. *International Journal of Cultural Studies*, 16(2), 169-187.
- [27] Bolaños, M. y Luque, A. (2019). Análisis bibliométrico de la Revistas Signos investigación en sistemas de gestión periodo 1996-2016. *Revista Signos* 11(2), 181-193.
- [28] González, J. y Montenegro, D. (2016). *Average Filtering: Theory, Design and Implementation*. Nova Science Publisher.
- [29] Runeson, P. (2016). Mere numbers aren't enough: A plea for visualization. En T. Menzies, L. Williams y T. Zimmermann (Eds.), *Perspectives on Data Science for Software Engineering* (pp. 303-307). Morgan Kaufmann.
- [30] Creswell, J. (2007). *Qualitative inquiry & research design: Choosing among five approaches*. Sage Publications.
- [31] Riveros, J. y Aya, M. (2013). Conflict maps in social media: From traditional arenas to 2.0 environments. Recuperado: <https://ana.esomar.org/documents/conflict-maps-in-social-media>.
- [32] Uzoka F. y Ijatuyi O. (2005). Decision support system for library acquisitions: A framework. *The Electronic Library*, 23(4), 453-462.
- [33] Pian, C. y Meneghini, R. (2007). Assessment of scientific programs: A necessary procedure for Brazilian scientific policy— The Young Investigator Program of the State of São Paulo Research Foundation. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 79(3), 543-562.
- [34] Howard Partners. (2003). *Evaluation of the Cooperative Research Centres Programme*. Recuperado: <http://www.howardpartners.com.au/publications/crc-report.pdf>.
- [35] Godet, M. y Durance, P. (2007). *Prospectiva Estratégica: Problemas y métodos*. Recuperado: <https://archivo.cepal.org/pdfs/GuiaProspectiva/Godet2007.pdf>.

Relación de la fuerza máxima de agarre y de pinza con la edad y el género en un grupo de trabajadores del sector industrial

Magda Viviana Monroy Silva¹
Danna Alejandra Jiménez García¹
Christian Ricardo Zea Forero²
¹Universidad Santo Tomas
²Pontificia Universidad Javeriana
Colombia

Colombia en su normatividad establece la obligatoriedad de implementar sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo (SG-SST) que promuevan el bienestar físico, psicológico y social del trabajador, y tiene como finalidad la prevención de lesiones, accidentes y enfermedades laborales. A nivel laboral se ha desatado gran interés por prevenir la aparición de desórdenes músculo esqueléticos relacionados con el trabajo, puesto que se han convertido en las enfermedades laborales con mayor incidencia. Dentro de las estrategias de prevención para mitigar estas enfermedades se ha considerado el fortalecimiento muscular y el acondicionamiento físico de los trabajadores, sin embargo, en Colombia no se cuenta con referentes relacionados con las capacidades físicas de los trabajadores y en los últimos años se han realizado esfuerzos aislados en busca de caracterizar esas capacidades físicas dentro de las que se encuentran la fuerza de agarre, la fuerza de pinza y la antropometría. En cuanto a la fuerza de agarre y la fuerza de pinza, estudios han demostrado que están relacionadas con características del individuo como la edad, género e índice de masa corporal; y con actividades de la vida cotidiana y laborales que involucran fuerza. El presente estudio tiene como objetivo determinar la relación de la fuerza máxima de agarre y de pinza con la edad y género de un grupo de trabajadores del sector industrial de la ciudad de Bogotá. La población es de 58 mujeres y 72 hombres de empresas del sector textil, construcción, manufactura, tejidos, fabricación de colchones y servicios de salud (IPS); se aplicó un estudio no experimental de corte transversal en donde se tomaron como variables dependientes las fuerzas de pinza (palmar pinch y lateral pinch) y la fuerza de agarre, en contraste con las variables dependientes de edad y género. Para la valoración de la fuerza de agarre y de pinza se realizaron pruebas de dinamometría isométrica, los datos fueron analizados por medio de regresión logística. Se evidenció una relación estadísticamente significativa entre las variables independientes edad y género, y las variables dependientes de fuerza máxima de agarre y la fuerza máxima de pinza (palmar pinch y lateral pinch) para ambas manos con un nivel de significancia =0.000.

1. INTRODUCCIÓN

La capacidad física del ser humano cambia según las características de cada individuo y se basa en las condiciones físicas que este posee; varían en base al metabolismo del cuerpo y se ven reflejadas en las acciones mecánicas que el sujeto elabore, pues, éstas pueden identificarse por medio del rendimiento muscular [9]; las capacidades físicas son caracterizables debido a que se pueden llegar a medir y están compuestas por la fuerza, la velocidad, la resistencia y la movilidad, se ven reflejadas en las actividades laborales, las cuales varían según el sector en el que se desempeñe el trabajador, ya sea administrativo o industrial.

La fuerza se puede definir como la capacidad de tensión que puede generar cada grupo muscular a una velocidad específica de ejecución contra una resistencia. La generación de fuerza es, por tanto, una de las características esenciales del ejercicio muscular, y es que toda expresión de rendimiento físico puede reducirse, en términos biomecánicos, a la unión de la fuerza y el movimiento [22]. La fuerza de agarre es una característica importante en el envejecimiento, desarrollo, lesiones, entrenamiento, terapia y rehabilitación. La fuerza de agarre de la mano se ha evaluado con mayor frecuencia, debido a su importancia como indicador de la función de la mano [23, 26]. La medición de fuerza manual se puede lograr con métodos subjetivos y dependen del juicio del individuo para la interpretación de los resultados, o se puede lograr con métodos objetivos con el uso de un dinamómetro manual (dinamometría manual), y el uso de un dinamómetro de dedos o pinzometro (pinzometría manual) [24].

La fuerza de agarre es aquella que se implementa para sujetar o apretar objetos por medio de las manos, siendo así fundamental en temas como la ergonomía, esfuerzo físico, deportes entre otros [22], y fuerza máxima de pinza, se caracteriza desde dos formas de pinzamiento: a) lateral keypinch que se genera entre el dedo pulgar, índice y corazón implementada en tareas cotidianas como sostener un esfero y b) palmar pinch generada por el dedo pulgar y el dedo índice la cual es implementada en labores como abrir una puerta con una llave [23].

La valoración de la fuerza manual permite identificar el rendimiento físico y la condición nutricional de las personas [4], es un predictor de discapacidad de enfermedades como osteoartritis y artritis reumatoide, algunos estudios han reportado la asociación entre sarcopenia y osteoporosis [8]. La dinamometría manual también proporciona herramientas para prevenir enfermedades de origen laboral y desordenes músculo-esqueléticos (DME). La falta de estudios ergonómicos y de herramientas apropiadas para una manipulación eficiente del humano en el puesto de trabajo, corresponde a una situación que favorece el desarrollo de enfermedades laborales recurrentes como, por ejemplo: tendinitis, síndrome del túnel carpiano, pinzamiento nervioso, entre otros [27].

Los valores de dinamometría manual son específicos para una población, por tal motivo es necesario establecer límites normales y así poder generar predicciones de valores de fuerza de agarre y pinzometría, adicionalmente

también son necesarios para determinar asociaciones de valores dinamométricos a la prevención de enfermedades que originen discapacidad ya sea por causas naturales o por actividades laborales. Mateo y Cols diseñaron un estudio en población adulta de Teruel que relaciona la fuerza de agarre con el Índice de Masa Corporal (IMC) y la fuerza de agarre con el género y la edad de los participantes, de esta forma establecieron tablas teóricas que permiten relacionar el estado nutricional de la persona desde el punto de vista funcional, adicional pudieron determinar que los valores máximos suceden de los 20 a los 40 años, comenzando a descender un 8% por década [28].

En la ciudad de Milwaukee (USA) se desarrolló un estudio en adultos entre los 20 y 94 años de edad. El análisis de los datos incluyó la caracterización de fuerza de mano y pinzometría teniendo en cuenta la edad, el género y la dominancia de la mano. Se logró determinar que la dinamometría de mano y de pinza fueron estables desde los 20 a los 59 años de edad y a partir de los 60 años comienza a declinar [29].

Aunque los estudios anteriores muestran el desarrollo de tablas de dinamometría que buscan caracterizar la población [7, 8, 13-15, 17, 21, 26, 29, 30], es necesario tener en cuenta que dicha información debe ser actualizada de manera constante, de acuerdo a lo expuesto en [30]. Los autores realizaron un estudio de dinamometría manual con 120 sujetos y analizaron las variables de género y edad; la metodología que siguieron fue la misma que se realizó en un estudio reportado para una población de la misma región en el año 1985. Como conclusión determinan que para que las tablas de fuerza puedan seguir siendo utilizadas en el área clínica es necesario hacer un estudio más amplio y así actualizar los valores registrados.

En Colombia se han realizado proyectos de manera aislada que buscan caracterizar los valores de dinamometría manual. Así por ejemplo B Bustos y Cols. diseñaron un estudio realizado en la ciudad de Cúcuta con población aparentemente sana que transitaba por la ciclovía de la ciudad el día Domingo. Analizaron la fuerza de agarre de la mano teniendo en cuenta las variables de edad, IMC, y género. Reportaron por ejemplo que los hombres entre los 20 a 29 años de edad generan el pico más alto de fuerza, después de esa edad la fuerza prensil disminuye; en las mujeres la fuerza se incrementa entre los 30 y los 39 años [25]. En Bogotá el estudio de dinamometría realizado por O. Hincapié, fue llevado a cabo en la localidad de Usaquén con participantes de diferentes estratos socio-económicos y el análisis de la publicación se basa en los resultados de fuerza en la mano contrastados con la edad, el género, la dominancia de la mano y se hace un pequeño análisis sobre el oficio en el cual se desempeñan. En este caso el pico de la fuerza de agarre para los hombres y las mujeres se encuentra entre los 25 a los 44 años de edad, después de los 45 años la fuerza comienza a descender [23].

Por último, el estudio realizado en la Ciudad de Manizales [24], buscó evaluar asociaciones con la edad, el género, la ocupación y la dominancia. La población participante fueron personas mayores de edad y que se encontraran laboralmente activas. Los resultados proponen que la diferencia de fuerza por género para la mano derecha fue de 9,17 KgF y para la mano izquierda 11,4 KgF y ambas a favor de los hombres. No encontró asociaciones con la ocupación ni la dominancia.

Colombia en su normatividad establece la obligatoriedad de implementar sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo (SG-SST) que promuevan el bienestar físico, psicológico y social del trabajador, y tiene como finalidad la prevención de lesiones, accidentes y enfermedades laborales [2]. A nivel laboral se ha desatado gran interés por prevenir la aparición de desórdenes musculo esqueléticos relacionados con el trabajo, puesto que se han convertido en las enfermedades laborales con mayor incidencia, especialmente aquellos que afectan los miembros superiores y la zona lumbar de la espalda [3]. Esta situación se replica a nivel mundial, se ha convertido en un problema de salud pública y se ha relacionado ampliamente con las exigencias físicas del trabajo [5, 6, 11, 12]. Dentro de las estrategias de prevención para mitigar estas enfermedades se ha considerado esquemas de descanso-trabajo [10], el fortalecimiento muscular y el acondicionamiento físico de los trabajadores [1], sin embargo, como se ha mencionado en Colombia no se cuenta con referentes relacionados con las capacidades físicas de los trabajadores y en los últimos años se han realizado esfuerzos aislados en busca de caracterizar esas capacidades físicas dentro de las que se encuentran la fuerza de agarre, la fuerza de pinza y la antropometría.

Por tal razón, el presente estudio pretende realizar la valoración de la fuerza de agarre y la fuerza de pinza en población laboralmente activa de Colombia, específicamente tiene como propósito determinar la relación entre el género y edad con la fuerza máxima de agarre y de pinza en un grupo de trabajadores del sector industrial de la ciudad de Bogotá. Los resultados contribuyen a la generación de referentes de las capacidades físicas de la población laboral.

2. MÉTODO

2.1 Tipo y diseño de investigación

Este estudio es no experimental, de corte transversal y de tipo correlacional. Se analizaron las variables independientes, edad y género, en relación a las variables dependientes, fuerza máxima de agarre y fuerzas máximas de pinza (lateral pinch y palmar pinch).

2.2 Población y muestra

El presente estudio fue realizado con trabajadores de nueve diferentes empresas del sector industrial ubicadas en la ciudad de Bogotá, con las actividades económicas: textil, construcción, manufactura, tejidos, fabricación de colchones y prestadores de servicios de salud (IPS). Se involucró población adulta de la ciudad de Bogotá, que cumplieran con los siguientes criterios de inclusión: hombres y mujeres laboralmente activos, en un rango entre los 18 años a los 62 años de edad, sin antecedentes médicos o desordenes musculo-esqueléticos y sin entrenamiento físico en miembros superiores. El total de participantes fue de 152 trabajadores, de los cuales 130 cumplieron con los criterios de inclusión, 58 mujeres y 72 hombres.

2.3 Métodos de recolección de información

La recolección de información se desarrolló en cuatro etapas: a) consentimiento informado, b) características demográficas, c) valoración de la fuerza máxima de agarre, y d) valoración de la fuerza máxima de pinza (lateral pinch y palmar pinch) (Figura 1).

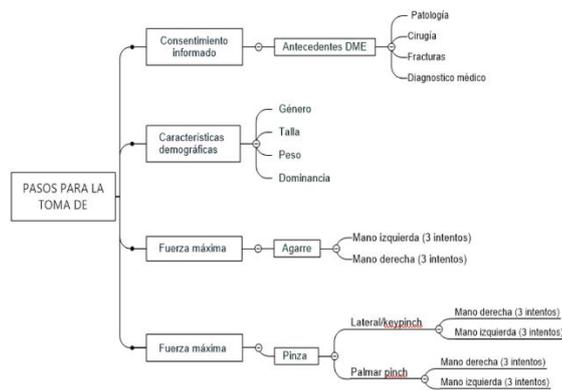


Figura 1. Recopilación de información

2.4 Valoración de la fuerza de agarre y de pinza

Para la valoración de la fuerza de agarre y de pinza se siguió el protocolo establecido por Reales, Monroy y Zea [16]. Las pruebas de fuerza máxima de agarre y de pinza se realizaron en el siguiente orden:

1. Fuerza máxima de agarre en mano derecha: Intento 1, 2 y 3
2. Fuerza máxima de agarre en mano izquierda: Intento 1, 2 y 3
3. Lateral pinch en mano derecha: Intento 1, 2 y 3
4. Lateral pinch en mano izquierda: Intento 1, 2 y 3
5. Palmar pinch en mano derecha: Intento 1, 2 y 3
6. Palmar pinch en mano izquierda: Intento 1, 2 y 3

En las pruebas, se solicitó al participante realizar un apretón fuerte con duración máxima de 3 segundos y se consideró un tiempo de descanso de 5 a 10 segundos entre intento e intento. El instrumento de medición utilizado para la valoración de la fuerza de agarre fue el dinamómetro Jamar y para la fuerza máxima de pinza tanto lateral pinch como palmar pinch, se utilizó el dinamómetro de dedos Jamar (pinchómetro). Para registrar el mayor valor de la fuerza de agarre y de pinza se utilizó la postura recomendada por la American Society of Hand Therapists (ASHT) (Figura 2). La persona debe estar sentada en una silla con soporte lumbar con la cintura y las rodillas en ángulo de flexión de 90°, tener los pies apoyados en el piso, debe tener los hombros en 0° de rotación paralelo al tronco, el codo debe estar flexionado a 90° grados sin soporte y el antebrazo en una posición neutra, la muñeca puede estar entre 0° y 30° de supinación, pero se recomienda estar en posición neutra [16].



Figura 2. Registro de la fuerza máxima de agarre

2.5 Métodos de análisis de información

La Definición de las variables independientes del modelo de Regresión logística se muestra en la Figura 3.

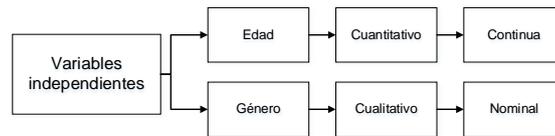


Figura 3. Variables independientes

La definición de las variables dependientes del modelo de Regresión logística se muestra en la Figura 4.

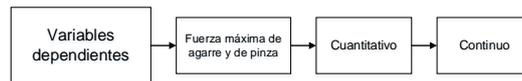


Figura 4. Variables dependientes

A continuación, en la ecuación (1) se presenta el Modelo matemático de regresión logística con el cual se determinó la relación que existe entre las variables dependientes (fuerza máxima de agarre, fuerza máxima de pinza palmar y fuerza máxima de pinza lateral) e independientes (edad y género).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon_i ; i = 1,2,3,4,5,6 \quad (1)$$

Donde:

β_0 = Constante

β_{in} = Coeficientes de la regresión

Y_1 = Fuerza máxima de agarre – Mano Derecha

Y_2 = Fuerza máxima de agarre – Mano Izquierda

Y_3 = Fuerza máxima palmar pinch – Mano Derecha

Y_4 = Fuerza máxima palmar pinch – Mano Izquierda

Y_5 = Fuerza máxima lateral pinch – Mano Derecha

Y_6 = Fuerza máxima lateral pinch – Mano Izquierda

X_1 = Edad

X_2 = Género

ε_i = Error residual

La prueba de hipótesis respecto a la variable edad es:

- Hipótesis nula: No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima i y la edad
- Hipótesis alternativa: Existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima i y la edad

La prueba de hipótesis respecto a la variable género es:

- Hipótesis nula: No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima i y el género
- Hipótesis alternativa: Existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima i y el género

$i = 1,2,3,4,5,6$

i_1 = Fuerza máxima de agarre – Mano Derecha

i_2 = Fuerza máxima de agarre – Mano Izquierda

i_3 = Fuerza máxima palmar pinch – Mano Derecha

i_4 = Fuerza máxima palmar pinch – Mano Izquierda

i_5 = Fuerza máxima lateral pinch – Mano Derecha

i_6 = Fuerza máxima lateral pinch – Mano Izquierda

En el análisis de la regresión logística se consideró un nivel de confianza del 95% y un error del 5%, y el tratamiento de los datos se realizó por medio del software estadístico IBM SPSS STATISTICS 22.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Características de los trabajadores del sector industrial en Bogotá

En el estudio participaron 39 personas en el rango de edad entre los 29 años y los 38 años, seguido de 38 personas en el rango entre 18 años y 28 años, 28 personas en el rango entre 49 años y 58 años, 19 personas en el rango entre 39

años y 48 años, y 6 personas en el rango de 59 años y 62 años de edad. En las empresas participantes, no se contó con vinculación laboral de un amplio número de adultos mayores (59 a 62 años) y por ende en el estudio la población con estas características fue limitada (Figura 5).

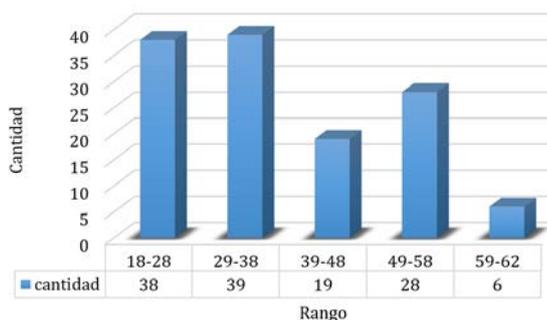


Figura 5. Población participante por rangos de edad

En relación al género, predominó la participación del género masculino, representado en 72 hombres que corresponden al 55% de los participantes. El 45% restante corresponde a la participación del género femenino, con 58 mujeres (Figura 6).

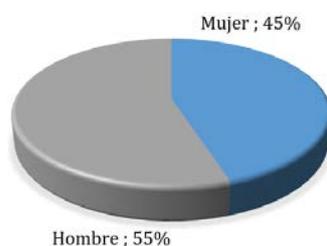


Figura 6. Población participante según género

La actividad laboral de los participantes se clasificó según la actividad económica en el sector industrial a la que pertenece la empresa en la que se encontraban vinculados. Se identificaron en total 6 actividades económicas: textil representada por 17 participantes, servicios de salud (IPS) con 16 participantes, tejidos con 14 participantes, construcción con 26 participantes, fabricación de colchones con 12 participantes y manufactura con 45 participantes. (Figura 7).

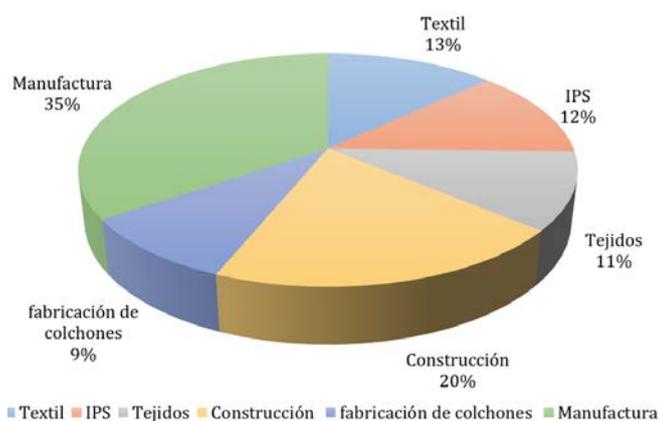


Figura 7. Población participante según actividad económica

3.2 Fuerza máxima de agarre

Para la fuerza máxima de agarre, en la mano derecha e izquierda, se hallaron los valores de mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, estos valores fueron hallados según rango de edad, género y población total. Según la Tabla 1, para la población total el valor promedio más alto de la fuerza de agarre se presentó en la mano derecha con 41,52 kgf (DS 13,29 kgf), y para la mano izquierda se obtuvo un promedio de 40,68 kgf (DS 13,50 kgf).

Respecto la edad, se evidencia que el valor promedio de la fuerza agarre en general disminuye en la medida que aumenta la edad. Los mayores valores promedio de la fuerza de agarre se presentaron en el rango de edad entre 18 y 28 años, con un valor de 44,7 kgf (DS 12,35 kgf) para la mano derecha y 43,01kg (DS 13,03 kgf) para la mano izquierda; y los menores valores, se presentaron en el rango de edad de 59 a 62 años, con un valor de 28,17 kgf (DS 6,02 kgf) en la mano derecha y 29,17kgf (DS 9,31 kgf) en la mano izquierda. En la mano derecha del total de registros, el menor

valor de fuerza de agarre se presentó en el rango de 29 a 38 años con un valor 19,33 kgf, y el mayor registro fue de 76 kgf en el rango de edad entre 39 y 48 años. A su vez, en la mano izquierda el menor valor registrado fue de 18,67 kgf en los rangos de edad de 18 a 28 años y 59 a 62 años; y el mayor valor fue de 82 kgf en edades entre 39 a 48 años. Se debe de tener en cuenta que la variabilidad de los registros de fuerza de agarre es ocasionada porque se consideraron los registros de hombres y mujeres en el mismo análisis.

Tabla 1. Valoración de la fuerza máxima de agarre

Fuerza máxima de Agarre		Mano derecha				Mano izquierda			
		Min	Prom	Max	D.S	Min	Prom	Max	D.S
Población	n=130	19,33	41,52	76,00	13,29	18,67	40,68	82,00	13,50
	De 18 a 28 años	20,00	44,77	66,00	12,35	18,67	43,01	64,67	13,03
Edad	De 29 a 38 años	19,33	42,14	71,33	14,74	21,33	42,27	78,00	10,61
	De 39 a 48 años	21,00	42,18	76,00	13,46	21,67	40,75	82,00	13,62
	De 49 a 58 años	23,23	38,68	68,67	11,72	23,67	37,73	68,67	12,05
	De 59 a 62 años	22,00	28,17	38,33	6,02	18,67	29,17	41,00	9,31
Género	Masculino (n=72)	31,33	50,90	76,00	9,69	35,67	50,37	82,00	9,66
	Femenino (n=58)	19,33	29,89	46,00	5,82	18,67	28,66	44,00	5,51

En relación al género, tanto para la mano derecha como izquierda, los hombres reportan mayores valores de fuerza de agarre respecto a las mujeres, con un valor promedio de 50,90 kgf (DS 6,69 kgf) en la mano derecha y 50,37kgf (DS 9,66 kgf) en la mano izquierda; mientras las mujeres registraron fuerzas promedio de 29,89 kgf (DS 5,82 kgf) en la mano derecha y 28,66 kgf (DS 5,51 kgf) en la mano izquierda.

3.3 Fuerza máxima de pinza: Lateral pinch

Igual que para la fuerza máxima de agarre, para la fuerza máxima de pinza lateral se hallaron los valores de mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, para la mano derecha e izquierda, según rango de edad, género y población total. En la Tabla 2 se identifica que, para la población total el valor promedio más alto de la fuerza de pinza lateral se presentó en la mano derecha con 8,46 kgf (DS 2,19 kgf), y para la mano izquierda se obtuvo un promedio de 7,89 kgf (DS de 1,96 kgf).

Tabla 2. Valoración de la fuerza máxima de pinza lateral (lateral pinch)

Fuerza máxima lateral pinch		Mano derecha				Mano izquierda			
		Min	Prom	Max	D.S	Min	Prom	Max	D.S
Población	n=130	3,33	8,46	17,13	2,19	3,60	7,89	12,30	1,96
	De 18 a 28 años	3,33	8,42	12,67	2,10	3,60	7,89	11,70	1,97
Edad	De 29 a 38 años	5,00	8,62	12,33	2,14	4,67	8,33	11,83	1,94
	De 39 a 49 años	5,83	8,56	11,57	1,87	5,00	7,80	10,77	1,74
	De 49 a 58 años	5,17	8,18	12,80	1,91	4,87	7,62	12,30	2,05
	De 59 a 62 años	4,60	8,66	17,13	4,78	4,30	6,65	9,50	2,16
Género	Masculino (n=72)	6,17	9,86	17,13	1,76	6,33	9,27	12,30	1,26
	Femenino (n=58)	3,33	6,72	9,33	1,19	3,60	6,18	10,03	1,15

Referente a la edad, según la estadística descriptiva de los datos, no se evidencia con claridad una tendencia de la fuerza de pinza lateral en función de la edad, especialmente en la mano derecha. Los mayores valores promedio de la fuerza de pinza lateral se presentaron en el rango de edad entre 59 y 62 años, con un valor de 8,66 kgf (DS 4,78 kgf) para la mano derecha y entre los 29 a 38 años con 8,33kg (DS 1,94 kgf) para la mano izquierda; los menores valores, se presentaron en el rango de edad de 49 a 58 años, con un valor de 8,18 kgf (DS 1,91 kgf) en la mano derecha y con 6,65kgf (DS 2,16 kgf) en la mano izquierda. En la mano derecha, del total de los registros, el menor valor de fuerza de pinza lateral se presentó en el rango de 18 a 28 años con un valor 3,33 kgf, y el mayor registro fue de 17,13 kgf en el rango de edad entre 59 a 62 años. A su vez, en la mano izquierda el menor valor registrado fue de 3,60 kgf en los rangos de edad de 18 a 28 años y el mayor valor fue de 13,30 kgf en edades entre 49 a 58 años. Se debe de tener en cuenta que la variabilidad de los registros de fuerza de pinza (lateral pinch) es ocasionada porque se consideraron los registros de hombres y mujeres en el mismo análisis.

Por otro lado, para el género, tanto para la mano derecha como izquierda, los hombres reportan mayores valores de fuerza de pinza lateral respecto a las mujeres, con un valor promedio de 9,86 kgf (DS 1,76 kgf) en la mano derecha y 9,27kgf (DS 1,26 kgf) en la mano izquierda; mientras las mujeres registraron fuerzas promedio de 6,72 kgf (DS 1,19 kgf) en la mano derecha y 6,18 kgf (DS 1,15 kgf) en la mano izquierda.

3.4 Fuerza máxima de pinza: Palmar pinch

Para la fuerza máxima de pinza lateral se hallaron los valores de mínimo, máximo, promedio y desviación estándar, para la mano derecha e izquierda, según rango de edad, género y población total. Según la Tabla 3, para la población total el promedio más alto de la fuerza de pinza palmar se presentó en la mano derecha con 7,51 kgf (DS 2,49 kgf), y para la mano izquierda se obtuvo un promedio de 7,30 kgf (DS 1,81 kgf).

Tabla 3. Valoración de la fuerza máxima de pinza palmar (palmar pinch)

Fuerza de máxima palmar pinch		Mano derecha				Mano izquierda			
		Min	Prom	Max	D.S	Min	Prom	Max	D.S
Población	n=130	3,33	7,51	12,00	2,49	3,40	7,30	11,00	1,81
	De 18 a 28 años	3,77	7,78	11,67	1,64	4,20	7,51	11,00	1,74
	De 29 a 38 años	3,33	7,12	11,70	1,93	3,40	7,27	10,87	1,97
Edad	De 39 a 49 años	4,67	7,32	9,57	1,41	5,50	7,41	9,00	1,11
	De 49 a 58 años	4,50	7,42	12,00	1,98	3,83	7,33	11,00	2,07
	De 59 a 62 años	5,00	6,24	8,70	1,89	4,33	6,02	8,33	1,72
Género	Masculino (n=72)	4,67	8,39	12,00	1,44	5,67	8,44	11,00	1,34
	Femenino (n=58)	3,33	6,09	9,57	1,33	3,40	5,88	8,90	1,23

En relación a la edad, según la estadística descriptiva de los datos, se presenta un panorama similar al de la fuerza de pinza lateral, es decir que, no se evidencia con claridad una tendencia de la fuerza de pinza palmar en función de la edad. Los mayores valores promedio de la fuerza de pinza palmar se presentaron en el rango de edad entre 18 a 28 años, con un valor de 7,78 kgf (DS 1,64 kgf) para la mano derecha y para el mismo rango de edad con 7,51kg (DS 1,74 kgf) para la mano izquierda; los menores valores, se presentaron en el rango de edad de 59 a 62 años, con un valor de 6,24 kgf (DS 1,89 kgf) en la mano derecha y en el mismo rango de edad con 6,02kgf (DS 1,72 kgf) en la mano izquierda. En la mano derecha el menor valor de fuerza de pinza palmar se presentó en el rango de 29 a 38 años con un valor 3,33 kgf, y el mayor registro fue de 12,00 kgf . En la mano izquierda, el menor valor registrado fue de 3,40 kgf en los rangos de edad de 29 a 38 años y el mayor valor fue de 11,00 kgf en dos rangos de edad diferente, entre 18 a 28 años y entre 49 a 58 años. Se debe de tener en cuenta que la variabilidad de los registros de fuerza de pinza (palmar pinch) es ocasionada porque se consideraron los registros de hombres y mujeres en el mismo análisis.

Según el género, tanto en la mano derecha como en la mano izquierda, se evidencia que los hombres poseen mayores valores de fuerza de pinza palmar respecto a las mujeres, con un valor promedio de 8,39 kgf (DS 1,44 kgf) en la mano derecha y 8,44kgf (DS 1,34 kgf) en la mano izquierda; mientras las mujeres registraron fuerzas promedio de 6,09 kgf (DS 1,33 kgf) en la mano derecha y 5,88 kgf (DS 1,23 kgf) en la mano izquierda.

3.5 Relación de fuerza máxima de agarre con género y edad

En los resultados de la regresión logística (Tabla 4), se evidencia que existe relación estadísticamente significativa entre la edad y la fuerza máxima de agarre en la mano derecha (significancia =0.000) e izquierda (significancia =0.000). De acuerdo con el coeficiente beta de la regresión en los dos modelos (mano derecha y mano izquierda), el cual presenta signo negativo, se puede inferir que hay una relación inversamente proporcional entre la edad y la fuerza máxima de agarre en la mano derecha e izquierda, es decir, que a mayor edad es menor el valor de la fuerza máxima de agarre en las dos manos.

Tabla 4. Regresión logística fuerza máxima de agarre vs. edad y género

		Fuerza máxima de agarre		
Efecto		β	chi-cuadrado	significancia
Mano derecha	Edad	-0,234	182,113	0,000
	Género Femenino	-2,471	167,744	0,000
	Género Masculino	0		
Mano izquierda	Edad	-0,256	165,843	0,000
	Género Femenino	-1,979	182,227	0,000
	Género Masculino	0		

Respecto al género, se identifica que hay una relación estadísticamente significativa con la fuerza máxima de agarre de la mano derecha e izquierda, con una significancia de 0.000. El coeficiente beta de la regresión en los dos modelos (mano derecha y mano izquierda), permite concluir que disminuye el valor de la máxima fuerza de agarre de las dos manos en el género femenino, en comparación con los valores reportados en el género masculino; es decir que las mujeres reportan valores de fuerza de agarre significativamente menores que los hombres en las dos manos. En conclusión, respecto a las pruebas de hipótesis planteadas, considerando un nivel de confianza del 95%, nivel de significancia del 5% y un error del 5%, se decide lo expuesto en la Tabla 5.

Tabla 5. Decisión pruebas de hipótesis en relación a la fuerza máxima de agarre

Variable	Hipótesis Nula	Decisión	Conclusión
Edad	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima de agarre <i>de la mano derecha y la edad</i>	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación significativa entre la fuerza máxima de agarre de la mano derecha y la edad
	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima de agarre <i>de la mano izquierda y la edad</i>	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación significativa entre la fuerza máxima de agarre de la mano izquierda y la edad
Género	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima de agarre <i>de la mano derecha y el género</i>	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación significativa entre la fuerza máxima de agarre de mano derecha y género
	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima de agarre <i>de la mano izquierda y el género</i>	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación significativa entre la fuerza máxima de agarre de mano izquierda y género

3.6 Relación de fuerza de pinza lateral (lateral pinch) con género y edad

La Tabla 6 presenta los resultados de la regresión logística asociada a la fuerza lateral pinch, en ella se evidencia que existe una relación estadísticamente representativa entre la variable dependiente fuerza de lateral pinch y la variable independiente edad para la mano derecha y la mano izquierda, con un nivel de significancia del 0,000 en los dos casos.

Tabla 6. Regresión logística fuerza máxima de pinza lateral vs. edad y género

		Fuerza máxima de pinza lateral (lateral pinch)		
	Efecto	β	chi-cuadrado	significancia
Mano derecha	Edad	24,274	156,079	0,000
	Género Femenino	-56,952	137,853	0,000
	Género Masculino	0		
Mano izquierda	Edad	-0.37	249,232	0,000
	Género Femenino	-0.98	171,064	0,000
	Género Masculino	0		

El coeficiente beta, para el modelo de la mano derecha, el cual tiene signo positivo, indica que hay una relación directamente proporcional entre la máxima fuerza lateral pinch y la edad de los participantes; es decir, a mayor edad aumenta la fuerza promedio de lateral pinch de la mano derecha. El coeficiente beta, para el modelo de la mano izquierda, permite deducir que hay una relación inversamente proporcional entre la máxima fuerza lateral pinch y la edad de los participantes; es decir, a mayor edad disminuye la fuerza promedio de lateral pinch de la mano izquierda. Considerando que los resultados son antagónicos para las dos manos, es importante, considerar que la población participante realiza labores diferentes y que la exigencia del gesto requerido para la fuerza lateral pinch no es el mismo en todas las actividades laborales, y que por lo general se realiza con la mano dominante, que en la mayoría de la población corresponde a la mano derecha.

Por otro lado, se identifica que existe una relación estadísticamente representativa entre la máxima fuerza lateral pinch y el género tanto para la mano derecha como para la mano izquierda, con un nivel de significancia del 0.000. Teniendo en consideración el coeficiente beta de los dos modelos (mano derecha y mano izquierda), se puede decir que el género con mayor fuerza de pinza es masculino seguido del género femenino, en el cual disminuye la máxima fuerza de agarre.

Respecto a las pruebas de hipótesis planteadas en relación a la fuerza lateral pinch, considerando un nivel de confianza del 95%, nivel de significancia del 5% y un error del 5%, se decide lo expuesto en la Tabla 7.

Tabla 7. Decisión pruebas de hipótesis en relación a la fuerza máxima de lateral pinch

Variable	Hipótesis Nula	Decisión	Conclusión
Edad	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima lateral pinch de la mano derecha y la edad	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación significativa entre la fuerza máxima lateral pinch de la mano derecha y la edad
	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima lateral pinch de la mano izquierda y la edad	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación significativa entre la fuerza máxima lateral pinch de la mano izquierda y la edad
Género	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima lateral pinch de la mano derecha y el género	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación significativa entre la fuerza máxima lateral pinch de la mano derecha y el género
	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima lateral pinch de la mano izquierda y el género	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación significativa entre la fuerza máxima lateral pinch de la mano izquierda y el género

3.7 Relación de fuerza de pinza palmar (palmar pinch) con género y edad

En los resultados de la regresión logística (Tabla 8), se evidencia que existe relación estadísticamente significativa entre la edad y la fuerza máxima palmar pinch en la mano derecha (significancia =0.000) e izquierda (significancia =0.000). De acuerdo con el coeficiente beta de la regresión en los dos modelos (mano derecha y mano izquierda), el cual presenta signo positivo, lo que sugiere que se presenta una relación directamente proporcional entre la edad y la fuerza máxima palmar pinch en la mano derecha e izquierda, es decir, que a mayor edad es mayor el valor de la fuerza máxima palmar pinch en las dos manos.

Tabla 8. Regresión logística fuerza máxima de pinza palmar vs. edad y género

		Fuerza máxima de pinza palmar (palmar pinch)		
	Efecto	β	chi-cuadrado	significancia
Mano derecha	Edad	0,785	174,805	0,000
	Género Femenino	-38,495	145,132	0,000
	Género Masculino	0		
Mano izquierda	Edad	0,016	153,556	0,000
	Género Femenino	-0,025	138,701	0,000
	Género Masculino	0		

Respecto al género, se identifica que hay una relación estadísticamente significativa con la fuerza máxima palmar pinch de la mano derecha e izquierda, con una significancia de 0.000. El coeficiente beta en los dos modelos, mano derecha y mano izquierda, para el género femenino tiene signo negativo, lo que indica que las mujeres reportan menores valores de fuerza palmar pinch que los hombres.

Respecto a las pruebas de hipótesis planteadas en relación a la fuerza palmar pinch, considerando un nivel de confianza del 95%, nivel de significancia del 5% y un error del 5%, se decide lo expuesto en la Tabla 9.

Tabla 9. Decisión pruebas de hipótesis en relación a la fuerza máxima de palmar pinch

Variable	Hipótesis Nula	Decisión	Conclusión
Edad	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima palmar pinch <i>de la mano derecha y la edad</i>	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima palmar pinch de la mano derecha y la edad
	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima palmar pinch <i>de la mano izquierda y la edad</i>	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima palmar pinch de la mano izquierda y la edad
Género	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima palmar pinch <i>de la mano derecha y el género</i>	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima palmar pinch de la mano derecha y el género
	No existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima palmar pinch <i>de la mano izquierda y el género</i>	No aceptar la hipótesis Nula	Existe relación estadísticamente significativa entre la fuerza máxima palmar pinch de la mano izquierda y el género

4. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió valorar la fuerza máxima de agarre y la fuerza máxima de pinza (lateral y palmar) en un grupo de la población laboralmente activa del sector industrial de la ciudad de Bogotá, no consideró población dedicada a labores administrativas, y difiere de investigaciones previas sobre el tema dado que no se concentró en una población general. En la población de estudio, el valor promedio de la fuerza máxima de agarre fue de 41,52 kgf en la mano derecha y de 40,68 kgf en la mano izquierda; el valor promedio de la fuerza máxima de palmar pinch fue de 8,46 kgf en la mano derecha y 7,89 kgf en la mano izquierda, y, el valor promedio de la fuerza máxima lateral pinch fue de 7,51 kgf en la mano derecha y de 7,30 kgf en la mano izquierda.

Las capacidades físicas de la población varían de acuerdo con características individuales de cada persona; este es el caso de la fuerza máxima de agarre y la fuerza máxima de pinza. El presente estudio se encuentra acorde con los reportes internacionales [7,8,13,14,15,17,21,26,29,30] y los pocos nacionales existentes [23,24,25], en los cuales se menciona que estas dos variables tienen comportamientos similares en contraste con la edad y el género; es decir, que la fuerza de agarre y la fuerza de pinza disminuyen en la medida que se envejece; y que la fuerza registrada en los hombres es significativamente más alta que la registrada en las mujeres. Adicionalmente, se evidenció que en la mano derecha se ejerció más fuerza que en la izquierda, pero que indiferente a la lateralidad, el comportamiento frente a la edad y el género es similar en las dos manos. Se debe mencionar que si bien el comportamiento estadístico es congruente con otras referencias es importante resaltar que en los estudios nacionales se están generando tablas con valores propios que permiten caracterizar el comportamiento de la población colombiana.

Es importante mencionar que, aunque en general se determinó una relación inversamente proporcional y estadísticamente significativa entre la edad y los valores de fuerza medidos, los valores de la fuerza de agarre presentaron una tendencia más clara respecto a la edad que los reportados en la fuerza lateral pinch y palmar pinch. En la fuerza de agarre los valores más altos se reportaron en el rango de edad entre los 18 y 28 años para las dos manos (derecha e izquierda), y los menores valores fueron registrados en el rango de edad de 59 a 62 años, en las dos manos. Por su lado, en la fuerza palmar pinch, los valores más altos se registraron en la edad entre 18 a 28 años en las dos manos, y los menores valores en el rango de 59 a 62 años, pero no se evidenció una disminución constante de la fuerza desde el rango inferior de edad hasta el rango mayor, fue variable. Mientras que, en la fuerza lateral pinch los valores más altos se reportaron en el rango de edad ente los 59 y 62 años para la mano derecha y en el rango de 29 a 38 años para la mano izquierda, y los menores valores se registraron en el rango de edad de 49 a 58 años para la mano derecha y en el rango de edad de 59 a 62 años en la mano izquierda, y su tendencia dentro de los rangos de edad evaluados no fue evidente, y se presentó discrepancia en los resultados de la regresión logística frente a la relación de la edad y la fuerza lateral pinch de la mano derecha y la mano izquierda.

La incertidumbre que se puede generar a partir de la tendencia de la fuerza lateral pinch y palmar pinch, podría estar explicada por la diversidad de tareas laborales que ejercían la población de estudio, de acuerdo con la actividad económica de la empresa en la que trabajan (construcción, textil, tejidos, manufactura, fabricación de colchones y servicios de salud) y la variabilidad del requerimiento de fuerza en las actividades manuales que realizan. Teniendo en cuenta que es escasa la literatura científica sobre estudios de fuerza de pinza a nivel mundial y en población colombiana, es importante ampliar la muestra de trabajadores con el fin de confirmar el comportamiento de la misma en población laboral de Colombia.

REFERENCIAS

- [1] Rodríguez, G., Delgado, Y. y Cárdenas, J. (2018). Diseño de un programa de acondicionamiento físico, enfocado al ausentismo relacionado con desordenes osteomusculares y que aporte al bienestar laboral y mejora en la productividad en el área de poscosecha de la empresa Flores de Tierra Grata SAS. Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- [2] Ministerio del Trabajo. (2019). Sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo. Recuperado: <http://www.mintrabajo.gov.co/relaciones-laborales/riesgos-laborales/sistema-de-gestion-de-seguridad-y-salud-en-el-trabajo>.
- [3] Ordoñez, A. et al. (2012). Asociación entre actividad laboral con gran demanda de esfuerzo físico y lumbalgia. *Acta Ortopédica Mexicana*, 26, 21-29.
- [4] Serrano, M. et al. (2009). Dinamometría en niños y jóvenes de entre 6 y 18 años: valores de referencia, asociación con tamaño y composición corporal - In *Anales de pediatría*. Doyma, 70, 340-348.
- [5] Antwi, M. et al. (2017). Biomechanical analysis of risk factors for work - related musculoskeletal disorders during repetitive lifting task in construction workers. *Automation in Construction*, 83, 41-47.
- [6] Rodríguez, R. et al. (2018). Dolor de espalda y malas posturas, ¿un problema para la salud? *Médica Electrónica*, 40, 833-838.
- [7] Shurrab, M., Mandahawi, N. y Sarder, D. (2017). The assessment of a two-handed pinch force: Quantifying different anthropometric pinch grasp patterns for males and females. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 58, 38-46.
- [8] Tajika, T. et al. (2015) Relationship Between Grip, Pinch Strengths and Anthropometric Variables, Types of Pitch Throwing Among Japanese High School Baseball Pitchers. *Asiática de medicina deportiva*, 58, 45-58.
- [9] Gutiérrez, F. (2011). Conceptos y clasificación de las capacidades físicas. *Cuerpo, Cultura y Movimiento*, 1, 77-86.
- [10] Maher, C. et al. (2017). Work-break schedules for preventing musculoskeletal disorders in workers. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 789, 456-467.
- [11] Ijaz, M. et al. (2020). Quantitative and qualitative assessment of musculoskeletal disorders and socioeconomic issues of workers of brick industry in Pakistan. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 345-359.
- [12] Amin, A. et al. (2020). Perceived physical demands in relation to work-related musculoskeletal disorders among nurses. Recuperado: <https://doi.org/craiuustadigital.usantomas.edu.co/10.1016/j.matpr.2020.01.196>.
- [13] Mohammed, S. et al. (2015). Experimental design to evaluate the influence of anthropometric factors on the grip force and hand force exertion. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 50, 9-16.
- [14] Bertrand, M. et al. (2015). Reliability of maximal grip strength measurements and grip strength recovery following a stroke. *Journal of Hand Therapy*, 89, 356-363.
- [15] McGee, C. et al. (2019). Age- and gender-stratified adult myometric reference values of isometric intrinsic hand strength. *Journal of Hand Therapy*, 123, 89-98.
- [16] Reales, A., Monroy, S. y Zea, F. (2019). Protocolo para la medición de la fuerza máxima de agarre: Una revisión sistemática. *Investigación Formativa en Ingeniería*. Recuperado: https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____2659::e35c33886d6f499fa54d01b4dd5c799b.
- [17] Nurul, S., Siti, Z. y Case, K. (2015). The relationship between anthropometry and hand grip strength among elderly Malaysians. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 50, 17-25.
- [18] Inal, E. et al. (2015). Effects of smartphone overuse on hand function, pinch strength, and the median nerve. *Músculo y nervio*, 52, 183-188.
- [19] Fernandez, P. et al. (2017). The effectiveness of manual therapy versus surgery on self-reported function, cervical range of motion, and pinch grip force in carpal tunnel syndrome: A randomized clinical trial. *Journal of orthopaedic y sports physical therapy*, 47, 151-161.
- [20] Salazar, M. y Mario, A. (2014). Fuerza máxima de agarre. Recuperado: <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/handle/unison/2349>.
- [21] Niels, S. et al. (2004). Identification of key pinch forces required to complete functional tasks. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2, 215-224.
- [22] García, Ó. et al. (2010). La fuerza: ¿una capacidad al servicio del proceso de enseñanza-aprendizaje de las habilidades motoras básicas y las habilidades deportivas específicas. *Investigación en Educación*, 8, 108-116.
- [23] Hincapié, O. (2007). Elaboración de estándares de la fuerza de agarre en individuos sanos entre 20 y 70 años residentes en la localidad de Usaquén, Bogotá. *Revista Colombiana de Rehabilitación*, 6, 5 -19.
- [24] Ramírez, M. y Fonseca, A. (2009) Fuerza de agarre en trabajadores sanos de Manizales. Universidad de Manizales.
- [25] Bustos, B., Acevedo, A. y Lozano, E. (2019). Valores de fuerza prensil de mano en sujetos aparentemente sanos de la ciudad de Cúcuta, Colombia. *Med Unab*. 3, 363-377.
- [26] Mahmoud, A. et al. (2020). Determining correlations between hand grip strength and anthropometric measurements in preschool children. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, 1, 75-81.
- [27] Shurrab, M., Mandahawi, N. y Sarder, M. (2017). The assessment of a two-handed pinch force: Quantifying different anthropometric pinch grasp patterns for males and females. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 58, 38-46.
- [28] Mateo L., Berisa L. y Plaza B. (2008). Nuevas tablas de fuerza de la mano para población adulta de Teruel. *Nutr Hosp*. 23, 35-40.
- [29] Mathiowetz, V. et al. (1985). Grip and pinch strength: normative data for adults. *Arch Phys Med Rehabil*, 66, 69-72.
- [30] Larzon, Z. (2017) Development of an updated normative data table for hand grip and pinch strength: A pilot study. *Computers in Biology and Medicine*, 86, 40-46.

Implementación de la metodología de Diseño Centrado en las Personas DCP para la identificación de oportunidades de innovación en el sector agrícola

Diana Katherine Parrado Hernández¹

Lizeth Fernanda Serrano Cárdenas²

Hugo Fernando Castro Silva¹

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

²Universidad Católica de Colombia
Colombia

El Diseño Centrado en las Personas (DCP) es una metodología que pretende la identificación e implementación de ideas innovadoras, donde las demandas, necesidades y perspectivas de los usuarios están integradas a lo largo del proceso de innovación, desde la identificación de la problemática hasta el diseño colaborativo de soluciones. A pesar de su relevancia para dicho propósito, aún se requieren investigaciones que se orienten a validarla, analizando las potencialidades y retos de su aplicación en escenarios que demanden soluciones de transformación. Con este objetivo, esta investigación tuvo como propósito la implementación de la metodología DCP en el sector agropecuario dedicado a la producción de Cebolla Bulbo, en una de las regiones colombianas más destacadas por la vocación a su producción: Boyacá. Para ello, se inició con la definición del reto de diseño: identificar oportunidades de innovación para el sector; posteriormente, se siguieron tres fases principales: Escuchar, Crear y Entregar, teniendo como centro del proceso a los usuarios y potenciales beneficiarios de las oportunidades que se pretendía identificar. Los resultados de la investigación, permitieron reconocer las ventajas y retos de la aplicación de la metodología en el sector agropecuario en territorios como los de las regiones colombianas. Igualmente, se encontró que, dentro de los principales retos del sector, están los altos costos de las semillas e insumos, la volatilidad de precios, las pocas plazas de comercialización y la dificultad de generar escenarios competitivos ante crecientes dinámicas de importaciones del producto objeto de análisis.

1. INTRODUCCIÓN

La dinámica de cambio en las sociedades, desde las primitivas, las grandes civilizaciones, las sociedades industriales, y por último las sociedades tecnológicas, ha generado transformaciones en el desarrollo intelectual de sus habitantes [1], retándolos a identificar nuevas formas de generar impacto y responder creativamente ante escenarios de alta complejidad, donde las soluciones no dependen de un solo actor, sino de esfuerzos colaborativos donde múltiples actores se articulen en red para innovar. Así, las transformaciones que hoy enfrenta la humanidad demandan que los diferentes actores de los ecosistemas de innovación se transformen con el propósito de enfrentar y superar los retos que se presentan en términos de hipercompetitividad, integración de nuevas tecnologías, escasez de recursos y la demanda creciente de productos y servicios innovadores [1].

Dichos retos, pueden ser enfrentados desde perspectivas como el Diseño Centrado en las Personas (DCP), entendido como un enfoque multidisciplinar para el desarrollo de productos basados en las necesidades humanas, que busca entender mejor al usuario objetivo y a sus actividades, permitiendo diseñar, evaluar y mejorar las propuestas a través de un proceso colaborativo de diseño que tiene como fin último la creación de productos o soluciones útiles, usables y pertinentes para los contextos donde se implementan [2]. El DCP es una aproximación para la innovación, que sitúa a la persona en el centro de todo el proceso, para algunos autores, el DCP se conceptualiza como una filosofía que tiene como premisa que el éxito de un producto dependerá de la calidad de la intervención de los usuarios en las diferentes fases del diseño de dicho producto, servicio o solución. En síntesis, el DCP podría entenderse como una metodología para planificar e implementar proyectos de innovación. La metodología está integrada por un conjunto de métodos y herramientas que facilitan el proceso de co-creación con el usuario a lo largo de las diferentes fases integradas en la construcción de soluciones de innovación [3].

Se ha identificado que la metodología DCP es particularmente pertinente ante las demandas de generar modelos de negocio que superen los esquemas tradicionales para competir [4]. Por ello, diversos países de América Latina y el Caribe han integrado este enfoque para impulsar iniciativas sociales, donde las comunidades sean el eje central de su planeación y ejecución. Este enfoque ha permitido que, en los últimos años, las comunidades involucradas luchan eficazmente contra la pobreza, la desigualdad y la exclusión social [5]. Algunas de estas iniciativas han sido destacadas por el concurso de *experiencias en innovación social*, organizado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe. A nivel global, se encuentra que los resultados de innovación que se esperan de la metodología de DCP, están alineados con las principales problemáticas priorizadas por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, en los objetivos de desarrollo sostenible [6], donde se pretenden poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y promover la agricultura sostenible. En particular, respecto a la urgencia de innovación en el sector de agricultura, la Organización de Naciones Unidas manifiesta que se necesita una reforma del sistema mundial de agricultura y alimentación si se pretende nutrir a los 815 millones de hambrientos que existen actualmente y los dos mil millones adicionales de personas que vivirán en el año 2050 [6].

Si se generan respuestas propositivas ante las problemáticas antes descritas manteniendo la agricultura, la silvicultura y las piscifactorías activas, dinámicas y crecientes, estas lograrán suministrar comida nutritiva para todos y generar ingresos significativos para las comunidades que las lideran, a la vez que se genera valor en términos del apoyo al desarrollo de la población campesina y a la protección del medio ambiente. La problemática de este sector es tal, que la humanidad por primera vez en casi 40 años, consume más alimentos de los que cosecha, [7] los inventarios de cereales y oleaginosas se reducen, las transnacionales especulan con el hambre y los precios de la comida se incrementan sin regulación. En este contexto, si no se garantiza el surgimiento, la protección y la innovación en la agricultura, según la afirmación de la Organización de las Naciones Unidas-ONU [8], la seguridad alimentaria del planeta continuará viéndose amenazada. Para la ONU [8], la agricultura es el sector que más empleo produce en el mundo, suministrando la forma de vida del 40% de la población mundial, así como la mayor fuente de ingresos y trabajo en los hogares pobres rurales.

En el caso colombiano, la situación no es diferente, y el agro es una fuente de ingresos importante en la economía nacional, siendo el protagonista en las cifras macroeconómicas del primer semestre del 2019 [9] y es que, hasta el momento, las cifras de empleo, Producto Interno Bruto (PIB), exportaciones, y colocación de crédito han registrado datos positivos por parte de este sector. La cebolla bulbo, es una parte importante de los productos que se generan dentro del sector agropecuario colombiano. Es un cultivo altamente desarrollado, que presenta un buen número de variedades que se adaptan a diferentes condiciones climatológicas, propias de la geografía colombiana. Cómo dato relevante se encuentra que la superficie total plantada de cebolla en el mundo asciende a más de 4 millones de Ha.

En específico, se encontró que para el año 2013 se produjeron 85,80 millones de toneladas de cebollas secas, cultivándose en todos los continentes y en diversidad de climas [10] y siendo Asia el mayor productor con 3.121.430 hectáreas, seguido por África con 659.271 y América con 294.699. Es interesante evidenciar que, de los 195 países reconocidos por la ONU, solo algunas pequeñas islas y territorios muy específicos no destinan una parte mayor o menor de sus campos a la cebolla.

Las cifras anteriores revelan la importancia del cultivo de cebolla bulbo en el mundo y en América, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO [11], la cebolla es uno de los productos más cultivados, consumidos y comercializados del mundo, siendo la hortaliza número 15 en la lista de producción de los principales productos agrícolas. A pesar de su importancia, muchos campesinos presentan dificultades para acceder a unos ingresos aceptables, lo que les obliga a emigrar a las ciudades en busca de oportunidades, esta situación genera pobreza y dificultad para acceder a una vida digna. Al observar el panorama de la agricultura dedicado al cultivo de cebolla bulbo en el mundo, en Latinoamérica y en Colombia, se encuentra que esta hortaliza suministra fuente de ingresos y trabajo a familias que viven de su producción y comercialización, por ello y según la FAO [11] Colombia tiene potencial como destino para proyectos agrícolas, siendo el cuarto país de América Latina con tierras disponibles para su producción.

En el caso puntual de la cebolla bulbo en Colombia, se encuentra que Boyacá es el principal productor a nivel nacional, pero los agricultores de esta hortaliza y otros alimentos agropecuarios como arveja, plátano y papa manifiestan su inconformismo por los altos costos de producción y los bajos costos percibidos por su venta. En términos simples, quien lo cultivó, preparó el suelo, sembró la semilla, hizo las desyerbas, fertilizó y recolectó la cosecha, además de que asumió los riesgos de inundación, vendaval, sequía y enfermedades, plagas y esperó seis meses para producirlo y sacarlo al mercado, recibió menos de una quinta parte del precio que pagó el consumidor [12]. Sumado a la problemática antes descrita, se encuentra que los factores tecnológicos, científicos y de innovación, asociados a la producción de esta especie de cebolla en Colombia tienen la característica de baja competitividad. Lo anterior, en conjunto, genera una compleja problemática sanitaria y de deterioro de los recursos ambientales, que resultan en bajos rendimientos, y que además termina repercutiendo en problemáticas ambientales más amplias, dado a la necesidad del uso intensivo de agroquímicos [13] e insumos que se alejan de la calidad esperada para productos para el consumo humano.

Considerando lo antes descrito, es evidente que se requieren nuevas posibilidades productivas y generar nuevas aproximaciones para abordar dichas problemáticas del sector, creando ideas innovadoras aplicables y replicables entre los agricultores dedicados a la producción de cebolla bulbo, aportando a la competitividad del sector y a la mejora de la economía de familias campesinas en el departamento de Boyacá. Este departamento, es el principal productor de cebolla bulbo, con 107.567 toneladas, seguido por los departamentos de Cundinamarca, Norte de Santander y Santander, las últimas cifras registradas por la producción nacional refieren 171.049 toneladas para el año 2017 y 97.498 toneladas para el 2018 presentando una disminución del 43% [14] haciendo evidente que la generación de proyectos basados en las necesidades del agricultor puede aportar a buen número de campesinos de la región de Boyacá, ya que a pesar de que ha disminuido su producción aún se cuenta con una gran población que cultiva este producto.

Dada la relevancia antes descrita, esta investigación genera dos contribuciones: primero, validar empíricamente la metodología DCP en el sector dedicado a la producción de cebolla bulbo en el municipio de Sogamoso Boyacá

contribuyendo de forma práctica al sector. En específico, se espera los resultados del estudio sirvan de referencia para la toma de decisiones de las autoridades municipales, los líderes gremiales y el agricultor de cebolla bulbo en general; y segundo, desde la perspectiva teórica, se trasladaron metodologías documentadas en la literatura a una aproximación práctica contrastando sus potencialidades; y siguiendo una perspectiva metodológica rigurosa, a través de la cual se espera aportar a la construcción de conocimiento sobre los retos de la implementación de metodologías de Diseño Centrado en la Persona en escenarios que demandan innovación social.

2. MÉTODO

La investigación se fundamenta bajo una estructura metodológica compuesta por dos fases: primero, se realizó una revisión de literatura para profundizar en el entendimiento del concepto de Diseño Centrado en las Personas-DCP. Para ello, en la búsqueda que integraron palabras clave como: *Desing Thinking, Human Centered Design* en bases de datos de literatura científica. Del proceso de revisión realizado, se encontró que la metodología DCP empieza con la identificación de un reto específico que se quiere resolver y pasa por tres fases principales: escuchar, crear y entregar [15] y que dicha metodología nace a partir del *Design Thinking*, o pensamiento de diseño, una metodología que contribuye a motivar el desarrollo de estas estrategias en las organizaciones. Esta filosofía, se inspira en los métodos usados por los diseñadores para la creación de sentido en sus proyectos, y se sustenta en la aproximación humana para la innovación.

La segunda fase metodológica, se orientó a la aplicación de la metodología DCP en el sector dedicado a la agricultura de cebolla bulbo, permitiendo así validar la utilidad de la metodología y su pertinencia en sectores agropecuarios.

Se destaca que, las dos fases implicaron un análisis riguroso de contenido, tanto de los documentos revisados, cómo de las entrevistas que debieron ser transcritas y posteriormente codificadas, utilizando categorías analíticas coherentes con los objetivos de la investigación. Este ejercicio de análisis riguroso fue realizado utilizando como apoyo el software de análisis de contenido MAXQDA®.

2.1 Revisión de la literatura

La metodología seleccionada para realizar la primera fase de la investigación se basa en una revisión de la literatura. Dicha metodología permite acceder a valiosos recursos con el objetivo de desarrollar una base de conocimiento [35]. La metodología permite resumir la evidencia que se tiene sobre un tema en particular e identificar las brechas existentes que apoyarán futuras investigaciones [16]. Según Kitchenham, [17], la metodología está conformada por tres etapas: la primera de planificación de la revisión, en la cual se seleccionó el objetivo de la revisión, se establecieron los criterios de búsqueda y se delimitaron las fuentes de información. La segunda, de desarrollo de la revisión, donde de manera profunda se desarrolla un proceso de lectura y de codificación de información. Finalmente, se estructuran los resultados obtenidos. La Figura 1 representa las etapas de la revisión de literatura desarrolladas en este estudio.

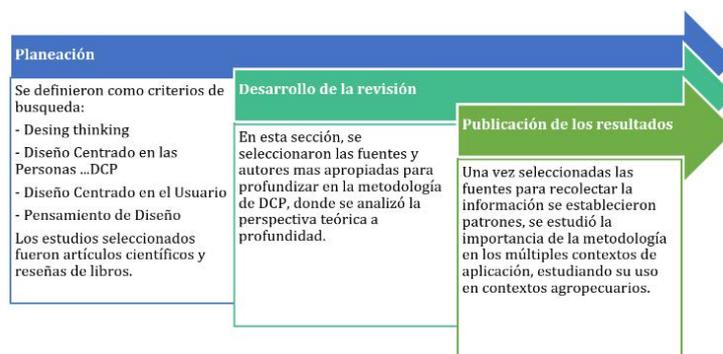


Figura 1. Etapas de la Revisión de literatura

2.2 Aplicación de la metodología DCP

Para el desarrollo de la investigación, se analizaron diferentes enfoques metodológicos que tuviesen como centro del proceso de innovación a los usuarios. En la literatura, se evidenció especial énfasis en dos enfoques metodológicos: *teoría de la U* y la *metodología DCP*. Tras verificar su aplicabilidad y beneficios se determinó que el enfoque del DCP era el más apropiado para los propósitos del estudio. En particular, se encontró que La metodología DCP contaba con un Kit de herramientas diseñado por IDEO [15], que facilitaba el desarrollo metodológico de la investigación. El Kit integraba herramientas para cada una de las fases de la metodología y documentaba experiencias previas de aplicación. Estaba diseñada para conocer información relevante sobre los usuarios, sus tareas y sus objetivos, y mediante la información obtenida de este proceso, orientar el diseño y el desarrollo de las posibles soluciones, obteniendo productos y servicios que realmente se orientaran a las necesidades, los deseos y las limitaciones de sus usuarios [15].

La metodología DCP nació a partir del Pensamiento de Diseño (*Design Thinking*), una filosofía de trabajo que se inspira en los métodos usados por los diseñadores para la creación de sentido en sus proyectos, y se sustenta en la aproximación humana para la innovación. Así, la puesta en marcha de la metodología DCP inició examinando las necesidades, sueños y los comportamientos de las personas dedicadas a la producción de cebolla bulbo, quienes se beneficiarán de las soluciones resultantes. Se escuchó al agricultor para comprender lo que deseaba y necesitaba. La metodología invitaba a que a lo largo de todo el proceso de diseño se viera el mundo desde los ojos del usuario y de la comunidad para la que se estaba diseñando la solución de innovación [3]. De allí la relevancia de esta metodología para la estructuración de proyectos de innovación en áreas y/o comunidades vulnerables [17]. La implementación del DCP se desarrolló en tres fases:

1. *Escuchar*. Durante esta etapa, se recopilaron historias, anécdotas y elementos de inspiración, se realizaron entrevistas a diez agricultores del municipio, que tras la inmersión profunda en el sector se detectaron como personas líderes y con conocimiento del sector. En el desarrollo del proceso de inmersión profunda, propio de esta fase inicial, se cumplieron las etapas que se observan en la Figura 2.



Figura 2. Fase uno de la implementación de la metodología DCP

2. *Crear*. En la segunda fase de la metodología (Figura 3), el equipo trabajo recopiló información mediante la puesta en marcha del *Foro - Taller, Innovación Social para el Sector Agropecuario dedicado a la producción de cebolla bulbo*. Los elementos analizados en esta fase, contribuyeron a mejorar la construcción del marco teórico de la investigación, así como a conocer las oportunidades y posibles soluciones propuestas por el agricultor frente a su problemática. Para estimular en los agricultores el *pensamiento de diseño* se utilizaron diversas herramientas tecnológicas como videos de inspiración análoga, y casos de éxito que estimularon su capacidad creativa y los retaron a plantearse nuevas formas de realizar su actividad económica. Esta fase fue quizás, la más importante dentro de la metodología ya que permitió conocer el sector a profundidad.



Figura 3. Fase dos de la implementación de la metodología DCP

3. *Entregar*. En esta fase se priorizaron los proyectos de innovación co-diseñados con los agricultores. Las ideas generadas se transformaron en proyectos, estructurados con un objetivo y con la definición de los recursos necesarios para su ejecución. Se espera que estos proyectos sirvan como insumo para facilitar su materialización por parte de los agricultores, los entes territoriales o líderes comunales interesados en generar impacto en este sector.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Entendiendo el Diseño Centrado en las Personas

La metodología Diseño Centrado en Personas, es un enfoque multidisciplinar para el desarrollo de productos, servicios, espacios, modelos de negocio, modos de interacción, o en general, soluciones fundamentadas en las necesidades humanas. Integra herramientas para entender mejor al usuario objetivo y diseñar soluciones más útiles y usables que las generadas a partir de procesos de innovación lineales [2]. En términos simples, el DCP es un proceso iterativo que se usa para crear soluciones nuevas para el mundo [17]. El concepto de Diseño centrado en las Personas (DCP), es una vertiente del *Design Thinking* (pensamiento de diseño) especialmente orientada al desarrollo de soluciones en el contexto social. Sin embargo, comparten principios, conceptualizaciones y enfoques.

De esta forma, al profundizar en el entendimiento del DCP es necesaria la comprensión del *Design Thinking* y viceversa. El *Design Thinking* se ha entendido como una metodología inspirada en los métodos usados por los diseñadores para la creación de sentido en sus proyectos integrando una aproximación humana para la innovación. Esta metodología ha sido de interés en el contexto de las ciencias administrativas, representado en el amplio número de publicaciones [18-20] que la justifican como una propuesta diferente a la lógica tradicional de los modelos de gestión, que contribuye a la innovación estratégica, a través del desarrollo de nuevos modelos de creación de valor para clientes y usuarios finales de dichas soluciones [21].

A pesar de la relevancia del concepto, se hace evidente las tendencias investigativas sugieren realizar investigaciones que integren la rigurosidad científica para evaluar y validar la efectividad de la aplicación del *Design Thinking*, en la práctica [22], permitiendo profundizar en los resultados descritos por experiencias de la implementación de esta filosofía [23].

El término *Design Thinking*, se ha aplicado tanto al área de diseño convencional, como al contexto de negocios, y ahora con el *Human Centered Design* (HCD), en español Diseño Centrado en Personas (DCP), es aplicado también en el ámbito del diseño social [15]. Los enfoques coinciden en conceptualizar estos términos como marcos de referencia que facilitan a los equipos, bien sea dentro de una organización o una comunidad para que actúen de forma colaborativa para innovar [24]. Aún no existe consenso universalmente acordada sobre la definición de *Design Thinking*, sin embargo, es evidente que los autores analizados coinciden en tres aspectos clave: el rol central del usuario durante el proceso de innovación, la necesidad de una aproximación empática para entender las necesidades de los usuarios y el desarrollo de una aproximación centrada en lo humano.

Según Gestwicki y McNely [25], no hay un consenso definitivo para la conceptualización e implementación del *Design Thinking*, este hecho se constata al analizar las diferentes propuestas metodológicas planteadas por los autores, la mayor parte de estas propuestas tienen en común que se diferencian de las propuestas tradicionales utilizadas en los modelos de gestión de la innovación. En la Figura 4 se consolidan las definiciones propuestas por diversos autores que han estudiado este campo de conocimiento. Dichas definiciones aportaron a la conceptualización más exacta sobre el tema. Asimismo, permiten evidenciar que la mayoría de los autores expuestos convergen en que el *Design Thinking* es un proceso que pretende solucionar rupturas y fenómenos en las organizaciones que les impiden innovar, centrando al usuario en el proceso de innovación en todas las etapas.

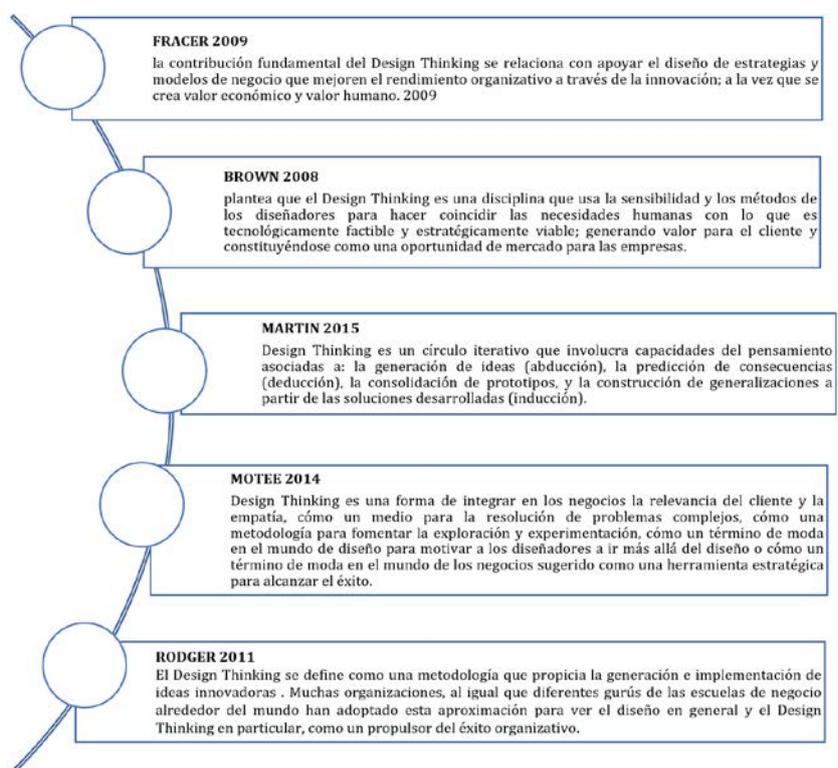


Figura 4. Definiciones Design Thinking [26-31]

Con el propósito de analizar las diferencias entre los enfoques de gestión de la innovación tradicional con el enfoque apropiado por el *Design Thinking* y por el Diseño Centrado en las Personas, Kumar [32] construye una visión ilustrada que se muestra en la Figura 5. Allí, se evidencia que la diferencia radica en que los últimos, centran sus métodos en la profunda comprensión del cliente, usuario o comunidad, mientras, los enfoques tradicionales incluyen a estos actores tan sólo en las últimas etapas de sus procesos, limitándose a escenarios dónde las soluciones se vuelven adaptables a los usuarios, pero no, dónde los usuarios co-diseñan dichas soluciones desde sus necesidades y demandas.



Figura 5. Diferencia entre los modelos de gestión de la innovación tradicionales vs DCP y/o *Design Thinking*

El enfoque de DCP mostrado en la Figura 4 fue propuesto por IDEO, firma internacional de diseño e innovación que utiliza el DCP para crear productos, servicios y experiencias que mejoran la vida de las personas y de las comunidades. Se ha convertido en una herramienta revolucionaria que permite la creación de nuevas soluciones, y se está implementando cada vez más para la generación de soluciones propositivas ante diversas problemáticas sociales [33]. Para facilitar la implementación del DCP, la organización IDEO, desarrolló el *Design Kit* [15], una plataforma abierta que busca enseñar los principios del DCP. Esta herramienta integra una gran variedad de formas de pensar, métodos y estudios de casos [33] que permiten comprender como esta metodología se ha implementado. Según el documento, la metodología de DCP está compuesta por tres momentos: Escuchar, Crear y Entregar.

En este *Design Kit* se integran herramientas para el desarrollo de cada fase metodológica: en la fase inicial de Escuchar, se encuentran lineamientos para realizar entrevistas individuales, grupales y para generar documentación por parte de la comunidad, en la etapa Crear, se encuentran guías para realizar sesiones de co-creación, realizar juegos, compartir historias inspiradoras; y finalmente, para la fase prototipar, se cuenta con herramientas para realizar pruebas piloto, diseñar estrategias de financiamiento y construir indicadores de éxito sobre las iniciativas generadas. Complementario a lo anterior, se integran videos e información complementaria sobre los fundamentos detrás de esta metodología y un centro de estudios de caso que presenta historias de cómo el DCP facilita el logro de resultados de innovación social.

En la Figura 6, se presentan algunos de los proyectos referente que fueron desarrollados con la metodología DCP, en los ejemplos revisados se evidencia que en esta metodología, el conocimiento clave no es el de los expertos de la organización, o de los líderes de las iniciativas; por el contrario, el conocimiento y la información más relevante será aquella que pueda co-construirse con sus partes interesadas [34], esto implica que la expansión de los ecosistema de innovación social impliquen esfuerzos para la creación conjunta [28] y el desarrollo de iniciativas bajo enfoques colaborativos.

01	02	03
EQUIPO LIMPIO	MONEYTHINK MOBILE	UNA ESCUELA QUE FLORECE
El equipo de IDEO diseñó un sistema de saneamiento para ghaneses de bajos ingresos. El servicio Clean Team es un inodoro de alquiler independiente diseñado a medida, así como un sistema de eliminación de desechos, pero el trabajo de diseño se extendió a todo el ecosistema de servicios, incluyendo marcas, uniformes, un modelo de pago, un plan de negocios y mensajes clave.	En las escuelas secundarias públicas de Chicago, adolescentes obtienen su primer gusto formal de la capacitación en educación financiera gracias a un programa de tutoría llamado Moneythink. El programa dirigido por voluntarios enseña estrategias como presupuestar, ahorrar y generar crédito. Es un modelo innovador que se ha ampliado rápidamente.	Primera Escuela Sustentable de Latinoamérica, la escuela N°294 de Jaureguiberry, Uruguay. El edificio es 100% autosuficiente en materia de energía y de agua. Durante los meses más fríos y los más calurosos mantuvo la temperatura ideal para que los niños estudiaran cómodamente, sin necesidad de abastecerse con energía eléctrica o combustibles. Una huerta interior y exterior con cultivos de alimentos abastece a alumnos y docentes.

Figura 6. Proyectos desarrollados bajo la metodología DCP

4.2 Proceso de implementación de la metodología del DCP en el sector dedicado a la producción de cebolla bulbo en el municipio de Sogamoso, Boyacá

En esta investigación la implementación del DCP se realizó a partir de lo propuesto por IDEO. Este proceso permitió identificar las personas con quien era necesario hablar para generar empatía, y así profundizar en sus historias de vida. Esto, siguiendo la literatura, dónde se argumenta que los métodos de investigación cualitativa le permiten al equipo de diseño desarrollar una profunda empatía con las personas con las que se está co-diseñando, cuestionar supuestos y sugerir soluciones nuevas. Por ello, una vez implementada la metodología con la comunidad objeto de

este estudio, se pudo evidenciar que, en efecto, el *Design Kit* facilita el logro de un acercamiento más profundo con el actor social, permitiendo conocer las historias, anécdotas y suceso de vida, situación que contribuyó a identificar y priorizar los retos de diseño abordados en la investigación. En la implementación de la metodología se evidenció la relevancia de considerar al usuario en el proceso de innovación desde el planteamiento del problema hasta la ideación de las posibles soluciones ante los retos identificados. A continuación, se profundiza en el proceso desarrollado y los aprendizajes derivados de la implementación de la metodología y de algunas herramientas específicas contenidas en el *Design Kit* de IDEO.

4.2.1 Desarrollo Fase 1: Escuchar

- *Herramienta Matriz de Interesados.* Para realizar una inmersión profunda en el sector sobre el cuál se estaban identificando las oportunidades de innovación, se consolidó la matriz de interesados. Esta matriz, permitió clasificar a los involucrados en el proyecto según sus niveles de interés y poder sobre el mismo. La utilización de esta herramienta facilitó la priorización de los *stakeholders* más importantes para la implementación del DCP. La literatura propone la importancia de seleccionar las personas claves *con quien hablar*, por ello, esta priorización se desarrolló a partir de la matriz de *stakeholders*.

Se encontró que el uso de esta herramienta favorece la fácil identificación del poder, la influencia y el interés de los actores principales del proceso, permitiendo conocer cuales requieren de menor o mayor esfuerzo para mantenerse satisfechos. Igualmente, permitió evidenciar cuales actores debían mantenerse informados sobre el proceso desarrollado y cuáles requerían una observación en términos de comportamiento para que no se afectara la ejecución de la metodología. En particular, en la investigación, el análisis expuesto en la Figura 7 permitió plantear las estrategias a seguir para mantener satisfecho, informado, y monitoreado al involucrado según el grado de interés y poder que tuviese.

INTERÉS	MUCHO	3. Satisfacer • Director del proyecto. • Sponsor.	1. Colaborar • Universidad UPTC
	POCO	4. Observar • Familiares de los agricultores • Vendedores de productos agrícolas • Alcaldía de Sogamoso • Ministerio de agricultura • Intermediario, consumidor final	2. Comunicar • Agricultores de cebolla. • Asesor del trabajo de grado
		POCA	MUCHA
INFLUENCIA			

Figura 7. Matriz influencia-interés *stakeholders*, según referente metodológico [35]

- *Herramienta inmersión profunda en el contexto.* Siguiendo la metodología de IDEO, se procedió a realizar una inmersión profunda en el sector dedicado a la producción de Cebolla Bulbo, en Sogamoso Boyacá, durante 2 meses. En este tiempo, se conocieron variedad de agricultores de la región y se validó lo planteado por la metodología, efectivamente, la inmersión permitió mediante el diálogo profundo, conocer características, en las cuales convergen la los agricultores y sus familias. A través de esta inmersión, se logró transferir a los agricultores la metodología DCP y se conoció su opinión sobre la misma. Se pudo identificar en el proceso que los agricultores estaban motivados a innovar, se destaca que identificaron que la metodología contribuía a establecer acciones de transformación en su labor productiva. La Figura 8 establece una síntesis de los principales hallazgos extraídos del proceso antes descrito.



Figura 8. Primeras características que se detectaron del sector dedicado a la producción de cebolla bulbo en Sogamoso

- *Herramienta Entrevista individual.* Las entrevistas individuales, se utilizaron para conocer de manera más cercana la situación del agricultor. Esta herramienta, permitió descubrir, a partir de las voces de los actores, tanto las oportunidades como las barreras sociales, políticas, tecnológicas, económicas y culturales en el sector y en el territorio. Esta herramienta, permitió consolidar una visión profunda y rica para el proceso de innovación. Se entendieron los comportamientos, los modos de pensar y la vida de los agricultores. Las entrevistas se

desarrollaron en las casas o lugares de trabajo, para así observar a los actores del proceso en su contexto natural y enriquecer el proceso de recolección de datos.

Una vez realizadas las entrevistas a los agricultores dedicados al cultivo de cebolla se pudo denotar que la mayoría de los entrevistados llevan más de 15 años dedicados al cultivo de la cebolla, por ello tiene amplia experiencia en el sector que les permite conocer de manera profunda la situación real del mismo, sus problemáticas, oportunidades, debilidades y fortalezas. Los entrevistados manifestaron que se dedicaron a este cultivo porque solía ser un producto rentable, pero que, en los últimos cinco años, la sobreproducción y la importación están haciendo de este un *negocio muy inestable y poco rentable*, e incluso algunos agricultores han decidido migrar a otro tipo de cultivos o trabajos.

Con esta herramienta se validó lo revisado en la literatura, en cuanto a que las entrevistas individuales permiten una visión profunda y rica de los comportamientos, los modos de pensar y la vida de la gente, así mismo se validó la importancia de aplicar esta herramienta en los lugares de trabajo y hogares para que el agricultor se sienta cómodo (Figura 9); pese a lo anterior, también se evidenció la complejidad en cuanto a captar la atención del agricultor y lograr establecer un vínculo de confianza para conocer la raíz de la problemática.



Figura 9. Entrevista individual a Daniel Acosta agricultor hace 30 años

- **Herramienta Líneas de vida.** La línea de vida es una herramienta que permite conocer los momentos más representativos en la vida del agricultor, en ella se expresan los momentos más felices y tristes durante su experiencia dedicándose a la producción de cebolla bulbo, al trabajar con esta herramienta se encontraron ciertas convergencias en el sector, que se mostraron en los siguientes mapas de palabras, construidos usando el software Nube de palabras.

Las entrevistas realizadas se hicieron en los hogares y lugares de trabajo de la comunidad, esto permitió crear un acercamiento profundo con el agricultor, en las entrevistas se utilizó la herramienta línea de vida, que apoyo la construcción de las Figuras 10 y 11, allí se detectó cuáles son los momentos más representativos en términos emocionales para los agricultores del sector.

La Figura 10 corresponde al mapa de felicidad, que permite conocer los momentos de mayor satisfacción en el tiempo que los diversos agricultores llevan dedicados a esta actividad económica, allí se puede destacar que, debido a la volatilidad del precio, los momentos de mayor felicidad se generan cuando el producto se encuentra a un buen precio de venta; sin embargo, destacan que esta felicidad es cada vez menos constante ya que los precios se mantienen a la baja. Otro de los momentos más felices de los agricultores, es cuando se genera innovación para facilitar su labor y se establecen nuevos mercados de venta.



Figura 10. Mapa de palabras momentos más felices

En contraste, se encuentra que el momento más triste en su actividad, es el bajo precio de producción, seguido por la importación y la falta de nuevas plazas de comercialización, a esto se le suma la baja competitividad dada por la poca tecnificación y los elevados precios de la materia prima Figura 11.



Figura 11. Mapa de palabras momentos más felices del agricultor del agricultor

Una vez establecidas las emociones, los momentos de satisfacción y de tristeza que ha pasado el agricultor se procedió a establecer si el agricultor conocía nuevas soluciones implementadas en el sector, como el uso de nuevas tecnologías que agilizan la labor productiva como tractores, equipo de riego y fumigadoras. Al respecto, según los agricultores, la tecnología usada es poco tecnificada y poco competitiva.

Además, se pudo reconocer que los agricultores comercializan su producto únicamente de dos formas, la primera directamente en la plaza mayorista en Bogotá, la segunda por medio de intermediarios que compran el cultivo directamente en el lugar de siembra, siendo la segunda opción la preferida por ellos ya que mencionaban que la plaza mayorista es un lugar *muy duro para negociar*; además que la logística asociada incrementa sus gastos. En el proceso, uno de los agricultores argumentó conocer un caso en donde se vendió directamente a un almacén de cadena importante en Sogamoso, en el cual la negociación fue desfavorable para el agricultor, ya que el producto que no se vendiera debía ser recogido por el agricultor y no se le pagaría.

Dado lo anterior, se indagó sobre la remuneración de este producto, para lo que se encontraron diversas opiniones de los agricultores, la Figura 12 muestra una línea de tiempo resultado de las repuestas generadas por los agricultores. Se denota a grandes rasgos como ha venido evolucionando el comportamiento económico del sector y como el agricultor viene pasando cada vez más dificultades y combatiendo contra la complejidad de diferenciarse bajo una estrategia de precio, que se ve afectado por las importaciones y la sobreproducción.

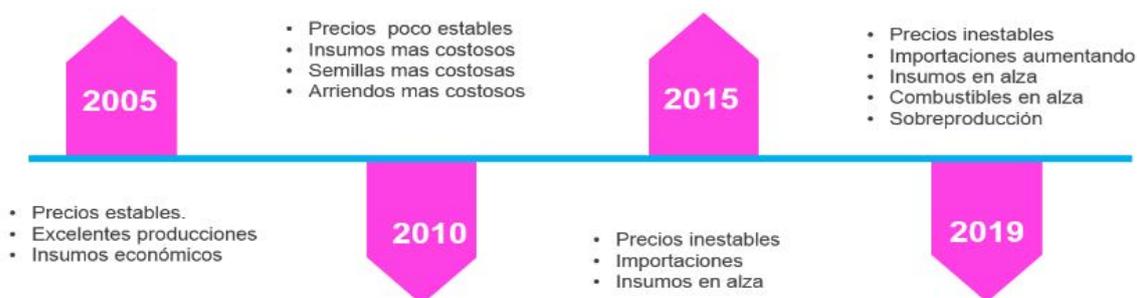


Figura 12. Características de la remuneración del cultivo de cebolla en los últimos 15 años, según los agricultores entrevistados

- *Herramienta conocimiento generado por la comunidad.* Al continuar el diálogo con los agricultores se indagó más a profundidad sobre las dificultades del sector, considerando así las problemáticas que este enfrenta día a día, es así que, para sintetizar las opiniones más relevantes, destacadas por los campesinos se realizó la matriz que se presenta en la Tabla 1. Una vez establecido los ítems de conocimiento generado por la comunidad que se identificaron como reiterativos en las entrevistas se pudo deducir que las problemáticas más relevantes se encuentran asociadas al precio de venta, las importaciones las fuentes de financiación y la maquinaria agrícola.

Esta priorización permitió determinar que estos eran algunos de los puntos que demandaban soluciones innovadoras. Adicionalmente, los agricultores manifestaron que no existe alguna asociación, gremio o institución dedicada a apoyar a este sector, lo cual deja en evidencia que es un grupo que no se encuentra agremiado ni cuenta con este tipo de organizaciones.

La implementación de esta herramienta, permitió validar lo expuesto en la literatura, se requiere consolidar el conocimiento generado por la comunidad y priorizar dentro de la pluralidad de visiones los elementos que pueden ser objeto de intervención, en este proceso, es clave el profundo entendimiento de los saberes de los actores.

Tabla 1. Principales dificultades del sector agropecuario dedicado a la producción de cebolla bulbo

Ítem	Grado de dificultad				
	1	2	3	4	5
Semillas				■	
Insumos (fumigos)				■	
Combustible		■			
Arreglo de tierra	■				
Instalación de riego	■				
Mano de obra			■		
Transporte		■			
Comercialización					■
Precios de venta				■	
Intermediarios			■		
Importación					■
Exportación			■		
Enfermedades			■		
Arriendos			■		
Inconvenientes climáticos			■		
Fuentes de financiación					■
Maquinaria agrícola					■

4.2.2 Desarrollo Fase 2: Crear

- *Herramienta Co-Diseño participativo.* En esta etapa se desarrolló el Foro - Taller, Innovación Social para el sector agropecuario dedicado a la producción de cebolla bulbo, este foro se realizó en casa de los agricultores acompañados de sus esposas y en algunos casos sus hijos, ya que todo el núcleo familiar se sostiene de la producción y venta de esta hortaliza. Durante el Foro - Taller, Innovación Social para el sector agropecuario, inicialmente se explicó al agricultor la metodología y su propósito. Una vez explicada la iniciativa, se estimuló su capacidad creativa mediante la presentación de innovaciones análogas en el sector agropecuario y en otros sectores económicos. A pesar de la importancia de este apartado según la literatura, se encontró que, al aplicarla, resultó especialmente complejo captar la atención de los actores y motivarlos a un proceso reflexivo y participativo. Al respecto, se evidenció la necesidad de acercar las herramientas a un lenguaje propio de los saberes de los agricultores y desarrollar una aproximación empática y flexible para ajustar las herramientas de cara a las necesidades del actor.

Esta herramienta, según la literatura permitía estructurar el reto de diseño, en conjunto con los actores. En la investigación, se explicó al agricultor diferentes dimensiones que podrían integrarse para solucionar las problemáticas del sector, que puede estar relacionado con la adopción de nuevas tecnologías, comportamientos, insumos, productos o servicios. Esto podría llevar a expresar el reto de diseño desde el punto de vista humano, partiendo de una pregunta con un enfoque orientado al actuar *¿Cómo podríamos?* Así, para iniciar a estructurar el reto de diseño se indicó al agricultor la construcción de cuestionamientos sobre su labor iniciando con dicha frase. En esta sección se dio un tiempo de 5 minutos donde el agricultor planteó diferentes retos de diseño (Figura 13) que fueron insumo para la siguiente fase de la metodología.



Figura 13. Evidencia foro Taller Innovación social para el sector agropecuario

4.2.3 Desarrollo Fase 3: Entregar

- *Identificar proyectos seleccionados y las capacidades que se necesitan para entregar las soluciones.* Una vez estructurados los retos, se generaron ideas que dieran respuesta a estas preguntas *Cómo podríamos*. En cuanto se finalizó dicho proceso de ideación, las ideas se subdividieron en clúster donde por votación los mismos agricultores y sus familias eligieron las ideas que consideraron, tenían el potencial de generar un cambio en su sector. Las dos ideas elegidas en esta sesión fueron plataforma de venta asociada y el tener un día de campo en las grandes ciudades:
 - *Plataforma de venta asociada:* los agricultores resaltaron la importancia de la asociación para este tipo de plataforma, sugiriendo que dicha asociatividad tenía el potencial de proveer el producto en almacenes de

grandes superficies. Sin embargo, para garantizar la sostenibilidad de dicha iniciativa, se hacía necesario un soporte tecnológico y podría estar vinculada a algún apoyo del Estado para favorecer su replicabilidad en los agricultores de la región.

- *Día de campo en las grandes ciudades:* esta idea nace pensando en el beneficio del agricultor y de la comunidad en general, a través de la idea, el agricultor, encontraría lugares donde vender directamente sus productos, fruvers, almacenes de cadena, tenderos y restaurantes, entre otras, eliminando así un intermediario de la cadena productiva.

Una vez completadas las fases de escuchar y crear, la fase tres, entregar, permitió establecer algunas de las soluciones co-diseñadas con los agricultores para eliminar intermediarios, y poder vender a un precio justo su producto, estas ideas fueron estructuradas como proyectos para agilizar su dinámica de implementación y quedan a disposición de los agricultores, entes territoriales, educativos y gubernamentales para adelantar el proceso que se plantea programas pilotos y realizar su implementación. La Figura 14 plantea la ruta que permitiría materializar las ideas antes descritas.

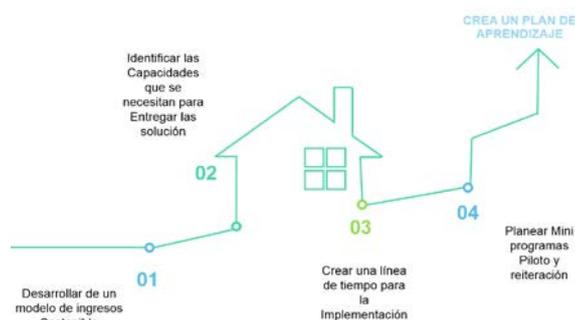


Figura 14. Fases para poner en desarrollo los proyectos planteados

5. CONCLUSIONES

En esta investigación, se siguió la metodología de Diseño Centrado en las Personas para desarrollar un proceso de innovación centrado en las personas en Boyacá, Colombia, que permitiera generar dos aportes: primero, desde la perspectiva práctica, validar empíricamente la metodología DCP en el sector dedicado a la producción de cebolla bulbo en el municipio de Sogamoso Boyacá, esperando que los resultados sirvan de referencia para la toma de decisiones de las autoridades municipales, los líderes gremiales y los agricultores para transformarse el sector desde un enfoque de innovación. Segundo, desde la perspectiva teórica, aportar a la construcción de conocimiento sobre el DCP desde el contraste de la teoría y la práctica. El ejercicio desarrollado permitió evidenciar, que, a pesar de la practicidad y relevancia de la metodología DCP, aún se requiere realizar más investigaciones sobre el tema que permitan validar su funcionamiento y utilidad para la Innovación y el Emprendimiento Social. En particular, se sugiere que futuras investigaciones se orienten a la construcción de conocimiento empírico desde diferentes geografías, analizando los contrastes y convergencias en la aplicación de este enfoque para la innovación.

Desde el análisis teórico, se encontró que la metodología DCP aún no cuenta con un consenso académico en relación con su definición. Sin embargo, se validó que tiene raíces teóricas en el concepto de *Design Thinking* o Pensamiento de Diseño, una metodología desarrollada para transformar los enfoques de gestión de la innovación a uno donde los usuarios, clientes, beneficiarios o comunidades estuviesen presentes en las diferentes fases y etapas del proceso de innovación: desde la comprensión de la verdadera necesidad, hasta la entrega de la solución, pasando por sesiones de ideación y co-creación. Se validó que, aunque los dos conceptos, centran al ser humano en el proceso para generar innovación, el *Design Thinking* profundiza su estudio en la generación de innovación en contextos empresariales, mientras el DCP ha centrado sus aportes en la resolución de problemáticas sociales con comunidades. El principal promotor del DCP a nivel teórico y práctico es IDEO, quien lanzó el *Design Kit*, el primer libro de su tipo que expuso cómo y por qué el diseño centrado en el ser humano puede generar impactos positivos en el sector social. Esta herramienta ha sido acogida por diseñadores, emprendedores e innovadores del sector social, quienes la estudian e implementan en diversas comunidades, para co-diseñar iniciativas de innovación social.

Derivado del ejercicio de implementación de la metodología DCP se encontró que, en la primera fase, Escuchar, las herramientas contenidas en el *Design Kit* facilitaron la inmersión profunda en el sector entendiendo de forma empática las necesidades desde las voces de los usuarios. Sin embargo, se encuentran retos asociados a la complejidad de generar confianza con los actores y lograr procesos reflexivos sobre dinámicas de trabajo que han sido desarrolladas de forma milenaria sin mayor énfasis en la innovación, cómo es el caso de la agricultura en la región estudiada. Igualmente, al utilizar la herramienta de construcción de líneas de vida, se encuentra cómo reto el direccionamiento de las preguntas para orientar la conversación. En general, en esta primera fase fue fundamental la visita a los lugares de trabajo de los actores que participaron del proceso, dado que facilitaron el posterior análisis de

la información agregando el contexto dónde estos datos se encuentran implícitos. Al respecto, se recomienda que futuros estudios se orienten a proponer y validar de forma empírica herramientas para la construcción de confianza con la comunidad previo al inicio de procesos de diseño de soluciones de innovación.

En la segunda fase, Crear, se evidenció que los procesos de ideación implican un profundo conocimiento del sector por parte de quienes participan y a la vez un contexto sobre nuevas oportunidades que se constituyan en referente para el proceso de repensar su actividad económica desde visiones transformativas. Se identificó que es un reto incentivar la participación de la comunidad, ya que, no todos los actores se sienten cómodos escribiendo, participando grupalmente e incluso expresando en voz alta sus ideas. Se encontró que en sus actividades cotidianas los actores no se ven enfrentados a estos procesos y desarrollar estos ejercicios no resulta tan ágil, dinámico y participativo, cómo se esperaba siguiendo las herramientas propuestas en el *Design Kit*. Facilitar estas sesiones de co-creación con los actores, sin subordinar las ideas de los mismos es un reto en el proceso de Diseño Centrado en las Personas. No se trata que el equipo que hace la inmersión en el contexto pretenda decirle a los actores y a la comunidad cómo solucionar las problemáticas que ellos, mejor que nadie conocen, en contraste, su labor deberá ser la de facilitar herramientas, adaptarlas y flexibilizarlas para potencializar la capacidad creativa de los actores, contribuyendo a que sean ellos quienes reinventen su futuro y el de su comunidad. Responder este reto, es quizá el elemento más complejo dentro de la implementación de la metodología DCP.

Finalmente, en la Fase Entregar, dónde las ideas se priorizadas y transformadas en soluciones estructuradas como proyectos, es clave que la comunidad con la que se co-diseño conozca el resultado final derivado de sus intervenciones, y más aún que vean sus voces reflejadas en los resultados. Si esto no se da, podría concluirse que la implementación del DCP no ha cumplido su propósito: generar una aproximación empática y centrada en las personas en el diseño de soluciones de innovación. Al respecto, se sugiere que futuras investigaciones se orienten a continuar profundizando en la evaluación de la metodología DCP desde un enfoque de generación de impacto, para ello, se identifica que se requieren estudios longitudinales dónde a lo largo del tiempo, se analice si la metodología realmente contribuyó a la comunidad dónde se desarrolló y si los actores lograron empoderarse de las herramientas para generar transformaciones en otros ámbitos de su realidad.

REFERENCIAS

- [1] Villalobos, K. (2018). Importancia de la Innovación Social. Recuperado: https://www.academia.edu/37375181/IMPORTANCIA_DE_LA_INNOVACION_SOCIAL.
- [2] Trujillo, M. y Aguilar, J. (2016). Los métodos más característicos del diseño centrado en el usuario -DCU-, adaptados para el desarrollo de productos materiales. Recuperado: <file:///C:/Users/NeiderFavian/Downloads/Dialnet-LosMetodosMasCaracteristicosDelDisenoCentradoEnEIU-6302030.pdf>.
- [3] Desing Toolkit. (2016). Desing Toolkit. Recuperado: <http://design-toolkit.recursos.uoc.edu/es/disenio-centrado-en-las-personas/>.
- [4] Rust, M. (2006). What academic research tells us about service? *Communications of the ACM*, 345, 49-54.
- [5] CEPAL. (2018). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Recuperado: <https://www.cepal.org/es/temas/innovacion-social/acerca-innovacion-social>.
- [6] ONU. (2018). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Recuperado: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>.
- [7] Bartra, P. (2008). Recuperado: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57952008000200002&script=sci_arttext.
- [8] ONU. (2018). Organización de las Naciones Unidas. Recuperado: <http://onu.org.pe/ods-2/>.
- [9] Minagricultura (2019). Recuperado: <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/El-agro-colombiano-fue-el-protagonista-en-las-cifras-macroecon%C3%B3micas-del-primer-semestre-MinAgricultura.aspx>.
- [10] Jumosol. (2017). La cebolla en el mundo. Recuperado: <http://www.jumosol.com/la-cebolla-en-el-mundo/>.
- [11] FAO. (2017). Recuperado: <http://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1024795/>.
- [12] Tovar, E. (2013). El Tiempo. Recuperado: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13052762>.
- [13] Pinzon, H. (2011). Los cultivos de cebolla y ajo en Colombia: Estado del arte y perspectivas. Recuperado: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/1198/1197.
- [14] DANE. (2016). El cultivo de la cebolla cabezona (*Allium Cepa L*) frente a condiciones de alta humedad. Bogotá.
- [15] Desing KIT. (2016). Diseño Centrado en Personas. Recuperado: <http://www.designkit.org/resources>.
- [16] Ribes, G., Perrello, M. y Diaz, O. (2017). Revisión sistemática de literatura de las variables clave del proceso de co-creación en las instituciones de educación superior. *Tec Empresarial*, 11, 3-12.
- [17] Cloudfront. (2016). Kit de herramientas DCP. Recuperado: http://d1r3w4d5z5a88i.cloudfront.net/assets/guide/Field%20Guide%20to%20Human-Centered%20Design_IDEOorg_Spanish-fffa025302066d08eb3247093e1f3a93.pdf.
- [18] David, D. y Roger, M. (2006). Design thinking and how it will change management education: An interview and discussion. *Academy of Management Learning & Education*, 5(4), 512-523.
- [19] Romme, G. (2003). Making a difference: Organization as design. *Organization science*, 14(5), 558-573.
- [20] Liedtka, J. (2000). In defense of strategy as design. *California Management Review*, 42(3), 8-30.
- [21] Verganti, R. (2009). Design driven innovation. Harvard Business School Publishing Corporation, 56, 272-285.
- [22] Hassi, L. y Laakso, M. (2009). Conceptions of design thinking in the design and management discourses open questions and possible directions for research. Pearson.
- [23] Sköldbberg, J., Woodilla, U. y Ceti, J. (2013). Design Thinking: Past, Present and Possible Futures. *Creativity and Innovation Management*, 22(2), 121-146.

- [24] Lindberg, T., Noweski, C. y Meinel, C. (2010). Evolving Discourses on design thinking: How design cognition inspires meta-disciplinary creative collaboration. *Technoetic Arts*, 8(1), 31-37.
- [25] Gestwichi, P. y McNely, B. (2012). A case study of a five-step design thinking process in educational museum game design. East Lansing.
- [26] Fraser, H. (2009). Designing business: New models for success. *Design Management Review*, 20(2), 56-65.
- [27] Brown, T. (2008). Design Thinking. *Harvard Business Review*, 123, 456-467.
- [28] Gracia, M. (2015). Análisis metodología de diseño centrado en usuarios. *TecsMedia*, 34, 89-98.
- [29] Rodgers, P. (2013). Articulating Design Thinking. *Design Studies*, 43, 433-437.
- [30] Cross, N. (2011). *Design thinking: Understanding how designers think and work*. Oxford, 78, 192-202.
- [31] Kumar. (2003). *Kumar.com*.
- [32] Comunicaciones Socialab. (2016). Design Kit, la nueva herramienta de IDEO para cambiar el mundo. *Socialab*.
- [33] Socialab. (2015). Blog Socialab. Recuperado: <https://blog.socialab.com/co-sistema-global-conoce-a-los-proyectos-que-forman-parte-del-portafolio-socialab/>.
- [34] Hatchuel, T. (2001). Towards design theory and expandable rationality: The unfinished program of Herbert Simon. *Journal of Management and Governance*, 5(3), 260-273.
- [35] Denyer, L. y Tranfield, D. (2009). Producing a systematic review. En D. Buchanan y A. Brymanthe (Eds.), *Handbook of organizational research methods* (pp. 671-689). Sage.

Percepción de la gestión del conocimiento en una facultad de ingeniería. Caso: Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia

Javier Hernández Cáceres
Jonathan David Morales Méndez
Heidi Patricia Camacho Grass
Universidad Santo Tomas
Colombia

Este trabajo presenta un análisis sobre la percepción que tienen los profesores sobre la gestión del conocimiento en la facultad. Partiendo del estudio de cuatro elementos o dimensiones claves para el desarrollo de este que fueron: la construcción del conocimiento al interior de la facultad, segundo, la integración del conocimiento, tercero, la diseminación del conocimiento y cuarto, usos y beneficios del conocimiento.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la gestión del conocimiento ha ocupado el interés de investigadores, directivos de empresas, instituciones públicas y las organizaciones en general. La gran atención que está atrayendo este campo se refleja en las publicaciones académicas, en el creciente número de congresos, y artículos publicados en revistas especializadas. Sin duda, constituye un área de investigación novedosa y compleja cuya gestación se inició a principios de los años noventa en países como Suecia y Estados Unidos y que rápidamente se expandió por diferentes economías.

Esta problemática se manifiesta en las universidades cuando se intenta abordar cuestiones relacionadas con los procesos de Evaluación Institucional, Acreditación de Carreras, diseño de presupuestos, presentación de proyectos con fines específicos, creación de nuevas carreras. A partir de las últimas tendencias en la ciencia de la administración la gestión universitaria puede ser abordada desde la Gestión del Conocimiento (Knowledge Management) [1].

En este trabajo se describe la visión del modelo de Gestión del Conocimiento y su relación con la administración de los procesos administrativos de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Santo Tomas, seccional Bucaramanga. En este sentido, este estudio se orientó a responder el siguiente interrogante relacionados con la gestión del conocimiento: ¿Qué Sistema de Gestión de la Información se debe usar o diseñar a partir de un modelo de aprendizaje organizacional aplicado a los procesos administrativos de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Santo Tomas, seccional Bucaramanga?

Por tal motivo la investigación se plantea como objetivo general el analizar las diferentes percepciones que tienen los profesores de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Santo Tomas de Bucaramanga, con relación a la gestión del conocimiento. Este objetivo se dividió en los siguientes elementos: 1) realizar un diagnóstico sobre las actividades y procedimientos que se relacionan con la gestión del conocimiento en la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Santo Tomas de Bucaramanga; 2) aplicar una encuesta de percepciones basada en el modelo de McAdam y Reid a los profesores de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Santo Tomas de Bucaramanga; y 3) analizar cuantitativa y cualitativamente la información obtenida a través de una encuesta aplicada en la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Santo Tomas de Bucaramanga.

2. MÉTODO

El objetivo del presente trabajo es identificar las percepciones que tiene los profesores de la facultad sobre los procesos de gestión y actividades que se llevan en la facultad, como también conocer el concepto que manejan sobre gestión del conocimiento. Esta caracterización además permitirá conocer las pautas para diseñar un modelo de gestión del conocimiento para la facultad de ingeniería industrial. Mostrar la importancia de la Gestión de Conocimiento, como un modelo innovador para las organizaciones, analizando las diferentes variables del entorno que influyen en el desarrollo organizacional, la importancia de tener claridad entre los conceptos: datos, información y conocimientos, así como el proceso de generación del conocimiento, dentro del ámbito de la Gestión del Conocimiento. En tal sentido es necesario retomar el concepto de gestión del conocimiento desde [2], hacen referencia a la construcción del conocimiento como la creación y desarrollo del mismo y lo visualizan como una dinámica que está enmarcada en por lo menos cuatro procesos de interacción entre conocimiento tácito y explícito de manera dinámica y continua [3].

La socialización, evento en el cual se adquiere conocimiento tácito mediante compartir experiencias, en las lecciones orales, documentos, manuales y tradiciones. La exteriorización donde se puede decir que el conocimiento tácito se puede explicitar por medio de conceptos facilitando su integración a la cultura de la organización u empresa. La interiorización donde se transforma el conocimiento explícito en tácito por medio del análisis de experiencias adquiridas. Y la combinación, reunir conocimiento explícito proveniente de varias fuentes para construir conocimiento explícito [4].

Para conocer la percepción de los profesores de la Facultad se realizó una encuesta conformada por 19 preguntas, diseñadas con base en el modelo de McAdam y Reid [5]. En las encuestas se analizaron cuatro elementos o dimensiones clave que son: primero, la construcción de conocimiento al interior de la organización. Segundo, la integración del conocimiento. Tercero, la diseminación del conocimiento. Cuarto, usos y beneficios.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Términos que denotan conocimiento

Los términos con mayor aceptación fueron en su orden: Competencias Curriculares y Tecnologías de Información con un valor promedio de 3,96 y en segundo lugar apareció aprendizaje organizacional con un valor de 3,91, esto se puede apreciar en la Figura 1. Con relación al término Competencias Curriculares, se podría pensar que el profesor de la facultad relaciona este término con la capacidad para la resolución de situaciones problemáticas, según el modelo pedagógico de la Universidad Santo Tomas, a la tecnología de la información como al uso de la tecnología en la gestión del conocimiento, y al aprendizaje organizacional se presenta como una alternativa que transforma la información en conocimiento [6].

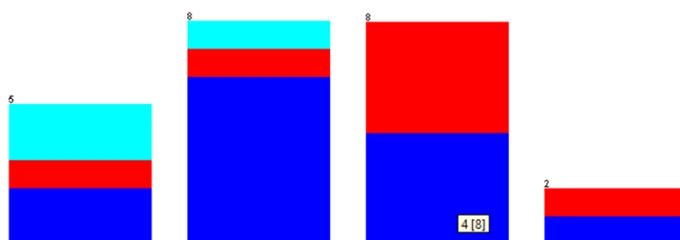


Figura 1. Términos que denotan conocimiento, datos presente estudio

3.2 Concepto de gestión del conocimiento

Se observó que el 30,4 % de los profesores asocio la frase creación y transferencia de conocimiento con el concepto de gestión del conocimiento y el 26,1% con aprendizaje organizacional. Por otro lado, solo el 8,7% asocio el término con sistemas tecnológicos y ninguno de los encuestados relaciono el concepto con socialización del conocimiento (Figura 2). Esta percepción es apropiada, pues la creación y transferencia de conocimiento se refiere a la manera que el conocimiento tácito se convierte en explícito cuando el profesional pone en contexto sus experiencias, creencias, habilidades y aptitudes en la solución de problemas y toma de decisiones [7].

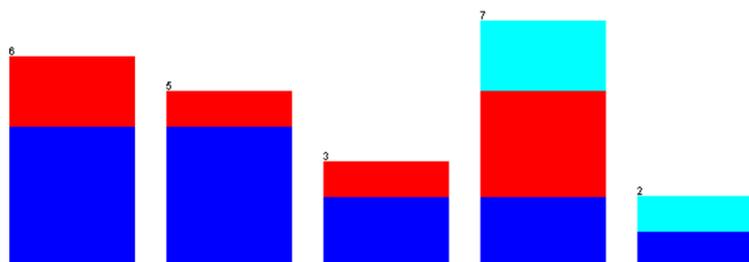


Figura 2. Concepto de gestión del conocimiento

3.3 Elementos de conocimiento

De acuerdo a las respuestas dadas , se pudo observar que el 73,9% de los encuestados perciben que el elemento de conocimiento más importante con el que cuenta la facultad es educación y entrenamiento, teniendo en cuenta a el entrenamiento como la educación profesional que busca adaptar a las personas a un determinado cargo; el segundo elemento con mayor aceptación fue activos intangibles este abarca el conocimiento de las personas y el conocimiento propio de la facultad con un 65.2% [9], y en tercer lugar los elementos información dura e información blanda con 60,9%. Por otra parte, el elemento con menos votación fue concentración de poder con 17,4%, todo esto se puede observar en la Figura 3.

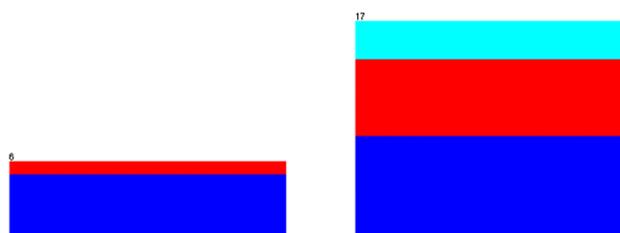


Figura 3. Elementos de conocimiento

3.4 Modalidad de generación de conocimiento

La forma como se genera el mayor volumen de conocimiento para los profesores de la facultad es de forma individual con un promedio de 4, seguido de la forma grupo homogéneo (grupo con miembros de la misma facultad) con un promedio de 3,78 (Figura 4). Con relación a la forma individual en que se genera el conocimiento resaltado por los profesores, algunos autores [9] considera que el mayor conocimiento proveniente de grupos interdisciplinarios que permitan la generación y creación de conocimiento nuevo.

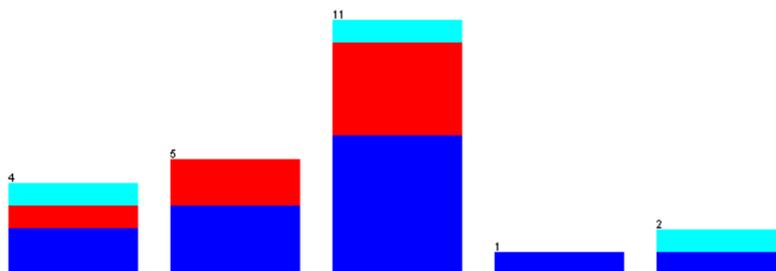


Figura 4. Modalidad de generación de conocimiento

3.5 Medios para crear conocimiento

Esta variable hace referencia al medio por el cual se crea conocimiento en la facultad. Los encuestados perciben que el medio más importante es el acceso a bancos de datos, foros, marcados con promedio de 4,0 [10], seguido de Cara a cara formal y planificada (oral), con un promedio de 3,91 y del uso de Tecnología de información (computadores), con un promedio de 3,83. Medios para crear conocimiento, se observa la representación gráfica de esta variable (Figura 5). En relación de cómo se crea conocimiento, este se construye a través de: Estrategias, metodologías, uso de recursos y conjunto de herramientas y se logra a través de un proceso conjunto con habilidades relacionadas con actitudes científicas, como; la curiosidad que nos lleva a la formulación de preguntas, el respeto y valorización del ambiente, la flexibilidad y tolerancia, el respeto por las ideas diferentes y la reflexión crítica.

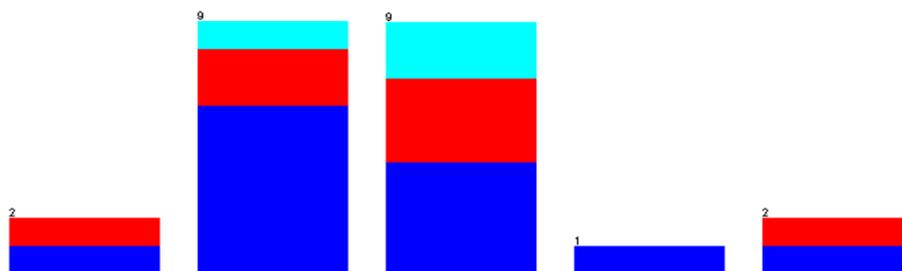


Figura 5. Medios para crear conocimiento

Para los profesores de la facultad ellos perciben que la mejor forma para crear conocimiento es mediante el acceso a bancos de datos, foros, mercados y el cara a cara formal y planificada (oral). Autores como Nonaka y Takeuchi [11] aseguran que la mejor forma de crear conocimiento es mediante la forma oral cara a cara, pues es donde las personas pueden interactuar y compartir experiencias significativas que permiten crear conocimiento nuevo.

3.6 Generación de conocimiento de acuerdo al cargo

Establece el medio por el cual se genera conocimiento nuevo en la facultad. Los encuestados perciben que este conocimiento proviene de los profesores con un promedio de 4,74, seguido de que proviene del decano con un promedio de 3,78. Por otra parte, los encuestados perciben que el medio que genera menos conocimiento es del secretario académico con un promedio de 2,52, esto se puede apreciar en Figura 6.

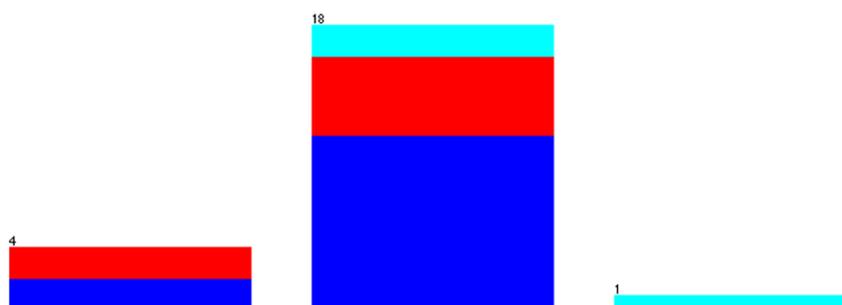


Figura 6. Generación de conocimiento de acuerdo al cargo

3.7 Generación de conocimiento de acuerdo al área funcional

Establece el área en la que según la percepción de los encuestados se genera mayor volumen de conocimiento. En la Figura 7 se puede inferir que las áreas que más generan conocimiento son gestión con un promedio de 4,26, investigación con un promedio de 4,17, métodos con 4,09, y emprendimiento con 3,83. Por otro lado, el departamento de ciencias básicas investigación obtuvo un promedio de 3,57. Este resultado permite deducir que la Facultad debe entrar en consonancia con la creación de una cultura investigativa, se refiere a la búsqueda y generación de conocimiento, a la experiencia de investigación de alto nivel a la docencia. Por lo anterior, implica para la facultad la creación de laboratorios con propósitos de investigación orientados a la transformación de productos y procesos en la enseñanza aprendizaje.

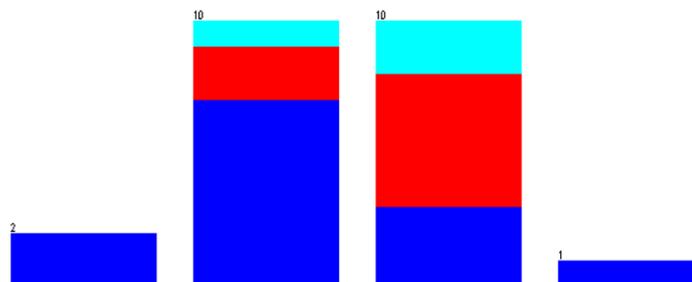


Figura 7. Generación de conocimiento de acuerdo al área funcional

3.8 Integración del conocimiento

En esta segunda parte de la encuesta se analiza como los profesores de la facultad perciben la captura del conocimiento, qué personas y en qué áreas, los roles de los cargos y las jerarquías dentro de la Universidad. La integración del conocimiento hace referencia al aprendizaje organizacional donde las habilidades adquiridas en la empresa se integran mediante diferentes formas a la propia organización, estas formas determinan el capital para la organización y está determinado por: Capital humano, Capital estructural y Capital relacional [12].

El capital humano recoge tanto las competencias entendiendo estas como los conocimientos, habilidades y actitudes en el contexto de cada organización, como la capacidad de aprendizaje y creatividad de las personas y equipos de trabajo [13]. El capital estructural, hace referencia a que el conocimiento debe ser sistematizado, explicitado o internalizado en la organización, permitiendo una transmisión rápida de conocimientos, generando una espiral ascendente de conocimiento y mejora continua, potenciando el conocimiento organizacional estructurado, es decir, reutilizando todo el conocimiento existente en la organización.

3.9 Almacenamiento sistemático del conocimiento

Establece la percepción que tienen los profesores sobre el almacenamiento sistemático del conocimiento dentro de la facultad. Los profesores perciben que el mayor grado de almacenamiento se da en la investigación con un promedio de 4,35, seguido de los profesores de planta con un promedio de 4,09, y el decano con 3,96. Con relación a la sistematización, este es un proceso que tiene como objetivo generar nuevos conocimientos o enriquecer los existentes a partir de situaciones reales. La sistematización de la información es la única manera que una organización tiene para retener el conocimiento, por esto, para la facultad es un proceso en el que deben estar involucrados todos los estamentos que conforman la facultad [14] (Figura 8).

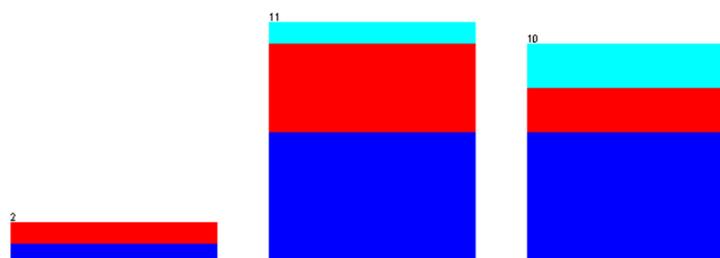


Figura 8. Almacenamiento sistemático del conocimiento

3.10 Actores responsables en la captura del conocimiento

Con esta variable se buscó determinar quiénes son los actores con mayor responsabilidad al momento de capturar el conocimiento dentro de la facultad, en la Figura 9 se infiere que un 34,8 % de los profesores perciben que el decano tiene esta responsabilidad, y un 17,4 % en triple empate percibe que es responsabilidad de cada persona implicada en su rol dentro de la facultad. Sin embargo, cabe resaltar que con 17,4 % de los encuestados afirman que nadie es

responsable de este proceso. En una organización es evidente que la captura del conocimiento es responsabilidad de cada uno de los individuos que la componen y está en los procesos y existe en todas las áreas y funciones de la organización. Sin embargo, para la facultad lo más importante es el aprendizaje (la transferencia de conocimiento) se ha convertido en un hecho social ocurre en redes formales y, sobre todo, en informales, y debe preservar el conocimiento y aprovechar la experticia de los profesores que pertenecen a la facultad.

Selected attribute		
Name: Responsabilidadcapturarconocimiento		Type: Nominal
Missing: 0 (0%)		Distinct: 5
		Unique: 0 (0%)
No.	Label	Count
1	Nadie	4
2	Decano	8
3	Coordinadordearea	4
4	cadapersona	4
5	Grupododocentesinvestigadores	3

Figura 9. Actores responsables en la captura del conocimiento

3.11 Obtención de conocimiento tácito

Esta variable buscó visualizar los escenarios de acuerdo a las percepciones de los encuestados donde se obtiene el mayor grado de conocimiento tácito. Con un promedio de 4,04 los encuestados perciben que este se obtiene en mayor grado de las evaluaciones, con 3,83 de las discusiones formales y con un 3,39 de las discusiones informales (Figura 10). De acuerdo a Nonaka y Takeuchi, se caracteriza el conocimiento tácito como altamente personal, difícil de formalizar y comunicar, parcialmente formado por habilidades técnicas (*knowhow*) y por dimensiones cognitivas: modelos mentales, creencias y perspectivas tan arraigadas que a la persona no le resulta fácil expresarlas. La percepción de los profesores, es que la creación del conocimiento es la conversión del conocimiento tácito a explícito mediante las evaluaciones y las discusiones formales e informales, esta conversión es posible si todos los miembros de la facultad se apropian del tema y participan activamente en todas las actividades encaminadas con este propósito.

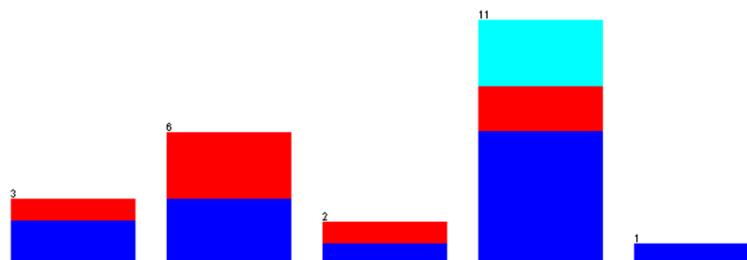


Figura 10. Obtención de conocimiento tácito

3.12 Medios para compartir el conocimiento

Esta variable buscó la percepción de los encuestados frente a la facilidad que brinda la Universidad para compartir el conocimiento. Se observa una dualidad entre dos bandos, unos afirman que la Universidad poco favorece el proceso de compartir conocimiento y el otro considera, que la Universidad facilita mucho los medios para este proceso con un 30.4% (Figura 11). Preservar el conocimiento a través de las discusiones, y aprovechar la experticia de las profesores dentro de la facultad es fundamental, sin embargo, preocupa la percepción de un grupo de encuestados que dice que la Universidad no facilita los medios para compartir conocimiento.

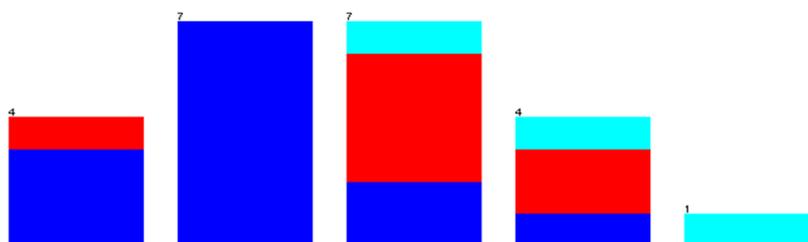


Figura 11. Elementos de conocimiento

3.13 Papel de la tecnología en la transferencia de aprendizaje

Con relación al papel de la tecnología en la transferencia de aprendizaje se pudo percibir que el 34,8% de los encuestados se encuentra ni satisfecho ni insatisfecho, el 30,4% satisfecho y el 17,4% muy satisfecho (Figura 12). Lo anterior muestra que los profesores ven a la tecnología y a su uso como una herramienta eficaz que facilita la transferencia del aprendizaje y el fomento del dialogo entre profesores. Sin embargo, hay un porcentaje de profesores que acusa estar insatisfecho con las herramientas tecnológicas, puede ser que consideren que falta mayor inversión en este campo o que desconozcan las herramientas tecnológicas que posee la facultad.

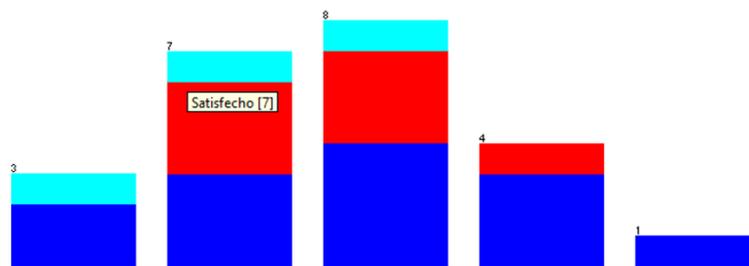


Figura 12. Papel de la tecnología en la transferencia de aprendizaje

3.14 La gestión del conocimiento vs el desarrollo del profesor

La percepción del profesor de la facultad frente a la gestión del conocimiento y su desarrollo y según se infiere de la Figura 13. Gestión del conocimiento vs el desarrollo del profesor, se determina que un 30,4 % afirma que siempre está ligada al profesor, de acuerdo con las necesidades de cada cual 26,1%, y la mayoría de las veces con un 21,7%. La gestión del conocimiento abarca tanto las competencias del profesor dentro de su rol como facilitador y gestor del conocimiento, en sus capacidades de transformar situaciones reales en conocimiento nuevo en cada una de sus actividades de docencia e investigación, por esto, la gestión del conocimiento esta siempre implícita en el desarrollo cada profesor [16]. Sin embargo, se pudo analizar que algunos profesores consideran que la gestión del conocimiento solo está ligada a su desarrollo en los momentos en que cada cual lo necesite.

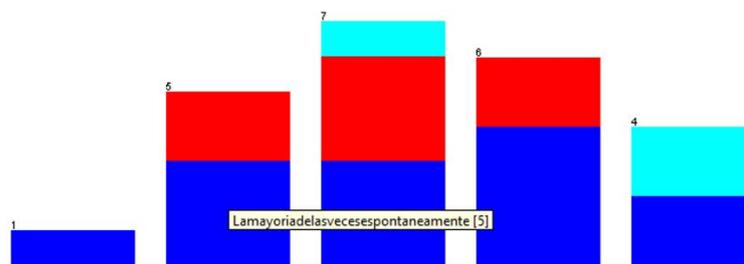


Figura 13. Gestión del conocimiento vs el desarrollo del profesor

3.15 Canales de transferencia del conocimiento

La diseminación del conocimiento hace referencia al proceso mediante el cual la información procesada, sistematizada y ordenada del conocimiento tácito se convierte en explícito a través de la difusión de la misma, mediante la comunicación en redes de personas que interactúan compartiendo sus conocimientos con apoyo de la tecnología [17]. Esta variable buscó determinar la percepción sobre cuál es el canal por el cual se transfiere conocimiento. Con un 4,35 de promedio, los encuestados perciben que el canal más importante son los cursos de formación internos y externos, con un 4,0 es la asistencia a congresos, foros y seminarios y con un 3,65 un grupo percibe que en las reuniones externas con otras universidades también son un canal efectivo de transferencia de conocimiento (Figura 14). Algunos autores como [15], recomiendan los diálogos cara a cara, los seminarios y las reuniones como métodos para la interacción y formas de compartir conocimiento.

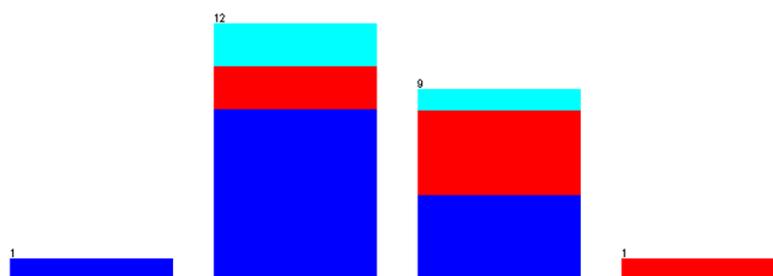


Figura 14. Canales de transferencia del conocimiento

3.16 Usos y beneficio del conocimiento

Rodney Mc Adam y Renne Reid [5] aclaran que la gestión del conocimiento trae también como resultado un aumento en la autonomía de los empleados, así como también se da un beneficio intrínseco por el aumento del conocimiento o aprendizaje. Lo cual representa un valor agregado a todos los grupos de interés de la empresa como son los clientes, empleados, proveedores, accionistas etc. Para el caso de la Universidad, a los estudiantes, profesores, y todos los miembros de la institución. La gestión del conocimiento busca a través de mejoras en los procesos, actividades o procedimientos que permitan una mejor gestión general de la empresa aumentando los negocios y los beneficios para los grupos antes mencionados; entre los usos y los beneficios más importantes que puede extraerse de la gestión del

conocimiento es la innovación como elemento clave y diferenciador para que el conocimiento tácito se convierta en explícito, además de generar un grado cada vez mas de confianza entre los trabajadores de una empresa o en el desarrollo personal del profesor.

3.17 Cambio provocado en el área de desempeño por el conocimiento

Estableció la percepción que tienen los profesores de la facultad frente a los cambios que ha generado el conocimiento en la facultad. Se observa que los profesores perciben con un promedio de 3,91 los cambios más significativos en la calidad e impacto de la investigación, seguido de la innovación en la enseñanza del aprendizaje con un promedio de 3,83, y con un 3,61, en la mejora de procesos internos con un promedio de 3,61 (Figura 15).

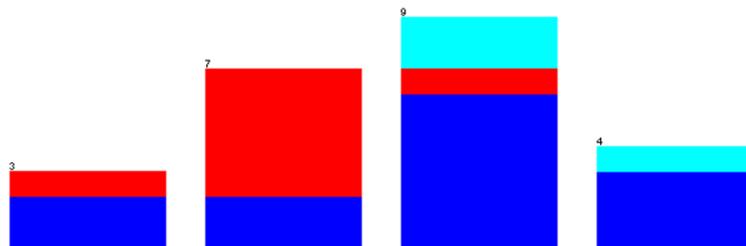


Figura 15. Cambio provocado en el área de desempeño por el conocimiento

3.18 Futuro de la gestión del conocimiento

Con esta se pudo establecer que el futuro de la gestión del conocimiento para la facultad y, de acuerdo con la Figura 16, se encuentra en el desarrollo de acuerdos de implementación de tecnología, con un promedio de 4,22, seguido del plan de la mejora en los medios para compartir la información con los profesores, con un promedio de 4,17, así como del plan de aumentar y compartir el conocimiento con los estudiantes con un promedio de 4,09. La percepción es positiva ya que la implementación y uso de la tecnología es vital para cualquier organización u empresa ya que los procesos van a ser cada vez más rápidos y automatizados. Como también la mejora de los canales de comunicación para compartir información entre los profesores y estudiantes que generaran conocimientos nuevos para la facultad.

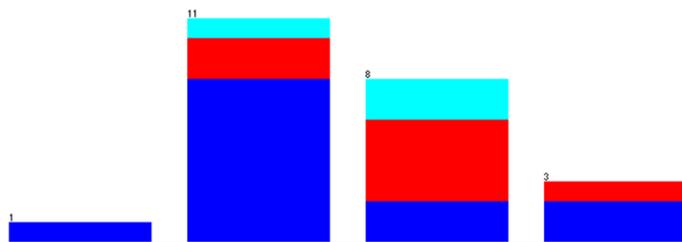


Figura 16. Futuro de la gestión del conocimiento de gestión del conocimiento

3.19 Beneficios de la gestión del conocimiento

Esta variable permitió conocer la percepción de los profesores de la facultad en cuanto al uso y beneficio de la gestión del conocimiento para la facultad. Se observa un empate entre los que consideran mejorar la eficiencia a todo nivel y mejorar el posicionamiento de la carrera con un promedio de 4,65. Seguido de los que establecen que se beneficia en la calidad de la investigación y su impacto con un promedio 4,57 y 4,52 respectivamente. Es claro que los profesores en estas variables apuntan a percibir que la gestión del conocimiento debe aprovecharse para el mejoramiento continuo y posicionamiento de la facultad. Pues hay muchos beneficios para la calidad y el impacto en los procesos de enseñanza-aprendizaje.

4. CONCLUSIONES

Elaborado el diagnóstico sobre las actividades y procedimientos que se relacionan con la gestión del conocimiento en la Facultad de Ingeniería Industria de la Universidad Santo Tomas, seccional Bucaramanga, analizadas cada una de las respuestas de la encuesta realizada a los profesores de la facultad, se procede a plantear las siguientes conclusiones.

La Facultad de Ingeniería Industria de la Universidad Santo Tomas, seccional Bucaramanga, tiene como soporte central para el cumplimiento de sus objetivos al término Competencias Curriculares, se podría pensar que el profesor de la facultad relaciona este término con la capacidad para la resolución de situaciones problemáticas, según el modelo pedagógico de la Universidad Santo Tomas. Y a la tecnología de la información como al uso de la tecnología en la gestión del conocimiento. Y al aprendizaje organizacional se presenta como una alternativa que transforma la información en conocimiento.

Con relación al término Gestión del Conocimiento, fue asociada a la creación y transferencia de conocimiento, en parte esta percepción es apropiada, pues la creación y transferencia de conocimiento se refiere a la manera que el conocimiento tácito se convierte en explícito cuando el profesional pone en contexto sus experiencias, creencias, habilidades y aptitudes en la solución de problemas y toma de decisiones.

Para los profesores de la facultad ellos perciben que la mejor forma para crear conocimiento es mediante el acceso a bancos de datos, foros, mercados y el cara a cara formal y planificada (oral). Autores como Nonaka y Takeuchi (1999) aseguran que la mejor forma de crear conocimiento es mediante la forma oral cara a cara, pues es donde las personas pueden interactuar y compartir experiencias significativas que permiten crear conocimiento nuevo.

En cuanto a la generación de conocimiento, los profesores perciben que este conocimiento proviene de los profesores. Según Nonaka y Takeuchi, la creación del conocimiento organizacional debe entenderse como un proceso que amplía el conocimiento creado individualmente y lo cristaliza como parte de la red de conocimientos de la organización. También afirman, que el conocimiento organizacional se encuentra en las mentes de los recursos humanos, así como alojado en documentos de diversos formatos o bases de datos, pero también en las rutinas, procesos, prácticas y normas institucionales.

La generación de conocimiento de acuerdo al área funcional fueron gestión, investigación, y emprendimiento. Este resultado permite deducir que la Facultad debe entrar en consonancia con la creación de una cultura investigativa, se refiere a la búsqueda y generación de conocimiento, a la experiencia de investigación de alto nivel a la docencia. Por lo anterior, implica para la facultad la creación de laboratorios con propósitos de investigación orientados a la transformación de productos y procesos en la enseñanza aprendizaje.

Sobre el almacenamiento sistemático del conocimiento dentro de la facultad. Los profesores perciben que el mayor grado de almacenamiento se da en la investigación, seguido de los profesores de planta, y el decano. Con relación a la sistematización, este es un proceso que tiene como objetivo generar nuevos conocimientos o enriquecer los existentes a partir de situaciones reales. La sistematización de la información es la única manera que una organización tiene para retener el conocimiento, por esto, para la facultad es un proceso en el que deben estar involucrados todos los estamentos que conforman la facultad.

En una organización es evidente que la captura del conocimiento es responsabilidad de cada uno de los individuos que la componen y está en los procesos y existe en todas las áreas y funciones de la organización. Sin embargo, para la facultad lo más importante es el aprendizaje (la transferencia de conocimiento) se ha convertido en un hecho social ocurre en redes formales y, sobre todo, en informales, y debe preservar el conocimiento y aprovechar la experticia de los profesores que pertenecen a la facultad.

La percepción de los profesores, es que la creación del conocimiento es la conversión del conocimiento tácito a explícito mediante las evaluaciones y las discusiones formales e informales, esta conversión es posible si todos los miembros de la facultad se apropian del tema y participan activamente en las actividades con este propósito

Con relación al papel de la tecnología en la transferencia de aprendizaje se pudo percibir que los encuestados se encuentran ni satisfecho ni insatisfecho. Lo anterior muestra que los profesores ven a la tecnología y a su uso como una herramienta eficaz que facilita la transferencia del aprendizaje y el fomento del diálogo entre profesores. Sin embargo, hay un porcentaje de profesores que acusa estar insatisfecho con las herramientas tecnológicas, puede ser que consideren que falta mayor inversión en este campo o que desconozcan las herramientas tecnológicas que posee la facultad.

La percepción del profesor de la facultad frente a la gestión del conocimiento y su desarrollo, afirma que siempre está ligada al profesor, de acuerdo a las necesidades de cada cual. La gestión del conocimiento abarca tanto las competencias del profesor dentro de su rol como facilitador y gestor del conocimiento, en sus capacidades de transformar situaciones reales en conocimiento nuevo en cada una de sus actividades de docencia e investigación, por esto, la gestión del conocimiento esta siempre implícita en el desarrollo cada profesor. Sin embargo, se pudo analizar que algunos profesores consideran que la gestión del conocimiento solo está ligada a su desarrollo en los momentos en que cada cual lo necesite

Sobre los canales de transferencia del conocimiento los encuestados perciben que los canales más importantes son los cursos de formación internos y externos, la asistencia a congresos, foros y seminarios. Algunos autores como Von Krogh, recomiendan los diálogos cara a cara, los seminarios y las reuniones como métodos para la interacción y formas de compartir conocimiento.

Ahora, los medios para compartir conocimiento, los profesores perciben que el conocimiento es compartido de manera significativa mediante el método de cara a cara formal, de igual manera el análisis de necesidades de capacitación y entrenamiento.

Respecto al cambio provocado en el área de desempeño, la percepción que tienen los profesores de la facultad frente a los cambios que ha generado el conocimiento en la facultad. Los cambios más significativos en la calidad e impacto de la investigación, y la innovación en la enseñanza del aprendizaje.

El futuro de la gestión del conocimiento, para los profesores, el futuro de la gestión del conocimiento para la facultad se encuentra en el desarrollo de acuerdos de implementación de tecnología, y en el plan de la mejora en los medios para compartir la información con los profesores, así, como del plan de aumentar y compartir el conocimiento con los estudiantes. La percepción es positiva ya que la implementación y uso de la tecnología es vital para cualquier organización u empresa ya que los procesos van a ser cada vez más rápidos y automatizados.

Como también la mejora de los canales de comunicación para compartir información entre los profesores y estudiantes que generaran conocimientos nuevos para la facultad.

En cuanto al uso y beneficio de la gestión del conocimiento para la facultad. Se observa al grupo que consideran mejorar la eficiencia a todo nivel y mejorar el posicionamiento de la carrera y otro grupo que establece que se beneficia en la calidad de la investigación y su impacto.

REFERENCIAS

- [1] Heinrichs, J. y Lim, J. (2003), Integrating web-based data mining tools with business models for knowledge management. *Decision Support Systems*, 35(1), 103–112.
- [2] Ono, A. y Valente, J. (2020). A criação do conhecimento de Nonaka Takeuchi: Ponderações acerca das principais críticas à teoria. *Brazilian Journal of Development*, 6(6), 37421–37439.
- [3] Tatto, L. y Bordin, R. [2016]. *Filosofia e Gestão do Conhecimento: Um estudo do conhecimento na perspectiva de Nonaka e Takeuchi*. *Cadernos Ebape*, 14(2), 340–350.
- [4] Hirose, A. et al. (2018). *Mitaka City Development: Collaborating in Harmony, Knowledge Creation in Community Development*. Pearson.
- [5] McAdam, R. y Reid, R. (2001). SME and large organisation perceptions of knowledge management: Comparisons and contrasts. *Journal of Knowledge Management*, 5(3), 231–241.
- [6] Rangel, A. (2016). Competencias profesores digitales: Propuesta de un perfil. *Píxel-Bit. Revista de Medios y Educación*, 46, 235–248.
- [7] Moreno, M. (2009). *Gestión del conocimiento en las organizaciones: Fundamentos, metodología y praxis*. *El Profesional de la Información*, 18(1), 111–114.
- [8] Tong, C., Tak, W. y Wong, A. (2013). The impact of knowledge sharing on the relationship between organizational culture and job satisfaction: The perception of information communication and technology (ICT) Practitioners in Hong Kong. *International Journal of Human Resource Studies*, 3(1), 9–19.
- [9] Sudhindra, S. Ganesh, L. y Arshinder, K. (2014). Knowledge transfer: An information theory perspective. *Knowledge Management Research & Practice*, 15(3), 400–412.
- [10] Dalkir, K. [2015]. Special issue on knowledge management for education. *Education for Information*, 31(1-2), 1–12.
- [11] Cheng, Q. y Chang, Y. (2019). Influencing factors of knowledge collaboration effects in knowledge alliances. *Knowledge Management Research & Practice*, 67, 1–14.
- [12] Vargas, A. y León, L. (2017). La gestión del conocimiento respecto a la organización que aprende, enfocado por teorías y tendencias a nivel nacional e internacional. *Ciencia y Poder Aéreo*, 11(1), 106–122.
- [13] Angulo, R. (2017). Gestión del conocimiento y aprendizaje organizacional: Una visión integral. *Informes psicológicos*, 17(1), 53–70.
- [14] Gauchi, V. (2012). Aproximación teórica a la relación entre los términos gestión documental, gestión de información y gestión del conocimiento. *Revista española de Documentación Científica*, 35(4), 531–554.
- [15] Pinto, H. [2012]. Instituciones, innovación y transferencia de conocimiento: contribuciones de los estudios sobre las variedades del capitalismo. *Arbor*, 188(753), 31–47.
- [16] Ruiz, M. (2015). Herramientas tecnológicas como instrumentos para la gestión del conocimiento en las organizaciones cooperativas. *Estrategias*, 12(22), 7–18.
- [17] Palacios, E. y Flores, M. (2016). Estrategias de diseminación de conocimiento tácito en una institución de educación superior. *Opción*, 32(8), 391–411.

Análisis a las causas del ausentismo laboral asociadas a los procesos productivos de las Pymes en el sector textil-confección

Claudia Ivonne Arámbula García
Manuel José Silva
Marieth María Perpiñán Araujo
Juan C. Acevedo-Páez
Universidad de Santander
Colombia

El sector textil-confección es considerado uno de los sectores más destacados debido a su importante generación de empleo, su aporte a la economía nacional y su capacidad de reinventarse, esta industria equivale al 6% del producto interno bruto y genera aproximadamente el 24% del empleo en el país. Sin embargo, en los últimos años su productividad y competitividad se han visto notablemente afectadas por el incremento del ausentismo laboral de sus trabajadores, por lo tanto, se hace necesario diseñar estrategias que propendan por la mitigación de las causas que dan origen al abandono, justificado o no, por parte del empleado durante la jornada legal de trabajo. Este capítulo busca analizar las causas del ausentismo laboral asociadas a los procesos productivos de las Pymes en el sector textil-confección de la ciudad de Cúcuta en el período 2015–2017, para tal fin, se aplicó una investigación descriptiva de corte transversal-retrospectivo, tomando una muestra por conveniencia de 6 empresas adscritas a dicho sector económico de la ciudad de Cúcuta, condicionado a que los sujetos participantes en el estudio cumplieran con los criterios de inclusión y exclusión. En el estudio se encontró que el mayor índice de ausentismo en las variables sexo y edad, lo presentan los hombres con un 55.73% y los trabajadores entre los 24-29 años. Asimismo, se pudo identificar que las ausencias fueron producto de enfermedades generales (55.3%), enfermedades laborales (33.5%) y accidentes de trabajo (11.2%). Se determinó que la patología causal de mayor frecuencia de ausentismos es la virosis (30.5%) que hace parte de las enfermedades generales, y los sistemas corporales más afectados son el sistema respiratorio y el sistema osteomuscular, con un índice de afectación del 34.4% y 29.6%, respectivamente. Finalmente, se diseñó un plan de acción ajustado a las principales causas del ausentismo e involucrando la relación con las afectaciones o enfermedades priorizadas para su control. El plan está compuesto por tres estrategias de trabajo, 1) prevención y control de desórdenes músculo-esquelético (DME), 2) cultura del autocuidado, y 3) estilo de vida saludable.

1. INTRODUCCIÓN

El ausentismo laboral es entendido como toda ausencia o abandono, justificada o no, por parte del empleado durante la jornada legal de trabajo [1]. El ausentismo ha pasado a convertirse en un fenómeno que día por día es más cotidiano, afectando la productividad, aumentando los costos de operación y representando una pérdida de competitividad a nivel empresarial, sectorial, regional y nacional. La productividad según Porter (1990) *es el determinante fundamental del nivel de vida de una nación a largo plazo... El nivel de vida de una nación depende de la capacidad de sus empresas para lograr altos niveles de productividad y para aumentarla a lo largo del tiempo* [2].

Por otra parte, el ausentismo se connota como un fenómeno sociológico que se relaciona de manera directa con las actitudes de los individuos, su edad, género, estado civil, formación académica y diversos factores de su entorno que puedan afectar la labor productiva que realizan [3, 4], o también desde actos individuales que generan ausencias justificadas o injustificadas de su trabajo [5, 6]. Ahora bien, otros autores profundizan en el concepto de ausentismo, relacionando directamente al contexto o situaciones por las cuales el empleado se ausenta (enfermedades físicas y mentales, accidentes de tránsito, problemas familiares, manifestaciones o huelgas, entre otras) conllevando una pérdida para el empleador, puesto que, la producción se ve directamente afectada [7-10].

Se puede asociar el ausentismo laboral directamente con la sostenibilidad económica de una empresa, ya que este incrementa los costos de personal, retraso de procesos, aumento de tiempos de producción, demoras en implementación de planes y estrategias, entre otros. Una de las maneras de medir su impacto es a través de la eficacia y la eficiencia empresarial, la eficacia es medible a través del cumplimiento de metas y objetivos principales, mientras la eficiencia se alcanza a medida que se logren estos objetivos con el mínimo costo posible. De esta forma se puede determinar qué tan productivo es un proceso interno e incluso se puede medir la productividad en general de una compañía [11].

De otra parte, la industria textil en Colombia, es uno de los sectores más destacados debido a su importante generación de empleo, su aporte a la economía nacional y su capacidad de reinventarse [12], esta industria equivale al 6% del producto interno bruto (PIB) y representa aproximadamente el 24% del empleo en el país. Es precisamente el fortalecimiento de los últimos años que le ha permitido consolidarse como una de las ramas de mayor participación dentro de la industria manufacturera nacional, alcanzando una participación de 3.6% para el primer trimestre del año 2019 [12]. En el sector manufacturero textil a nivel nacional existen 2.498 empresas afiliadas a las Administradoras de Riesgos Laborales (ARL), lo que corresponde a un 0.24% del total de afiliaciones, de las cuales 3.784 trabajadores son independientes y 65.345 son dependientes [13]. En el estado de la accidentalidad, se destaca que en el año 2017 este sector reportó el 0.77% del total de accidentes laborales en el país, y a su vez las enfermedades laborales corresponden al 0.76% del total de enfermedades calificadas como de origen laboral durante la misma vigencia [13].

Los accidentes en los puestos de trabajo y fuera de estos, siendo ocurridos en el horario laboral, siguen teniendo índices alarmantes en el país. En el año 2017 se presentaron cada día 1.800 accidentes laborales, y aun siendo menor la cifra a la reportada en el 2016 en un 6.5%, el costo en el que incurrieron las ARL para atenderlos se elevó un 12.1% anual [13]. Sectores como las actividades inmobiliarias, industria de manufacturas, construcción y comercio continúan aportando las mayores cifras de accidentalidad laboral en el país (59.5% del total reportado del año 2016) [14]. Dentro de las actividades con mayor accidentalidad se encuentra en la segunda posición, la industria manufacturera, con 89.311 casos en el año 2017 [14]. Según el informe de la Asociación Colombiana de Empresas de Medicina Integral (ACEMI), en el 2016, más de 1.7 millones de afiliados al régimen contributivo generaron 4.049.313 órdenes de incapacidad, es decir, al menos 11.000 diarias, un dato alarmante teniendo en cuenta que esto representó el ausentismo en 26 millones de días laborales [15].

En la ciudad de Cúcuta, el sector textil-confección cuenta con 525 trabajadores activos en las Pymes, dicho sector se destaca por una mano de obra calificada e idónea, materias primas y productos terminados de excelente calidad. Asimismo, la producción de *jeans* viene jalonando a las confecciones en la región y se está actualizando con tecnología de última generación. Desde Cúcuta se exportan confecciones hacia México, Guatemala y Costa Rica, entre otros destinos [16]. A pesar de que las empresas cuentan con planes y programas que ayudan a gestionar la seguridad y salud en el trabajo al interior de las mismas, no se cuenta con una caracterización completa del ausentismo laboral que permita incentivar la toma de decisiones por parte de la alta dirección, así como la generación de estrategias para disminuir el impacto de la ausencia de los trabajadores por enfermedades comunes, enfermedades laborales y accidentes de trabajo en las labores diarias de las empresas.

Al no contar con un diseño de estrategias para controlar el ausentismo en las Pymes, es probable que la productividad de los trabajadores continúe decreciendo sin posibilidad de identificar la causa raíz de forma oportuna para su tratamiento, lo que llevaría a aumentar los costos por incapacidades médicas, la probabilidad de ocurrencia de accidentes y enfermedades laborales, así como la alta tasa de rotación del personal.

El presente estudio tiene por objeto analizar el ausentismo laboral de los trabajadores del área operativa de las Pymes del sector textil-confección de la ciudad de Cúcuta en el periodo 2015-2017, con el fin de desarrollar estrategias y recomendaciones para reducir el impacto causado por dichas ausencias. La investigación se desarrolla en un estudio de carácter descriptivo, retrospectivo, transversal. Se recolectó la información por medio de una encuesta aplicada a los colaboradores de seis empresas tomadas como muestra. Una vez recolectados y tabulados los datos, se procedió a realizar el análisis y caracterización del ausentismo, para posteriormente determinar las estrategias que permitan direccionar todos los esfuerzos de la organización en pro de la disminución de los costos, aumento de la productividad y la mejora de las condiciones laborales del personal activo, así como una mayor eficiencia del sector textil-confección en el contexto local.

2. MÉTODO

Partiendo de la base que la metodología aplicada debe estar cercana al objeto de estudio para dar explicaciones y recomendaciones pertinentes. Se realizó un estudio retrospectivo, transversal con alcance descriptivo a partir de una encuesta tomando los datos suministrados por los trabajadores sobre eventos ocurridos en el período 2015-2017, en donde se buscó identificar la incidencia de algunas variables en el ausentismo laboral a partir de la información de los trabajadores encuestados, ya que no contaban con bases de datos que evidenciaran los registros de los casos de ausentismo o incapacidades. Cabe resaltar que, el estudio está dirigido únicamente al área de producción, siendo esta área la de mayor impacto en la productividad por los casos de ausentismo laboral, conformada principalmente por operarios fijos y rotativos.

De otra parte, se desarrolló una investigación con un diseño no experimental, donde se asumen, realidades tangibles susceptibles a ser analizadas, y de campo, donde la recolección de información se realizó directamente de los sujetos investigados, y de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular, controlar o alterar las condiciones existentes. En este tipo de diseño no se exponen a los sujetos de estudio a ningún tipo de estímulo o condición, por lo cual la medición de las variables se hace en el ambiente natural de los sujetos [17]. Así mismo, es transversal porque la caracterización de las variables se realizará en un momento único de las cuales se pretende establecer una relación entre ellas [18].

2.1 Población y muestra

Se trata del universo abarcado por la investigación, sobre el cual se generarán resultados. Al respecto Balestrini sostiene: *por población se entiende un conjunto finito o infinito de personas, casos o elementos que presentan características comunes* [19]. El departamento Norte de Santander tiene 1.929 empresas dedicadas a la confección, 51 que suministran insumos a los textiles y 32 lavanderías industriales. Para esta investigación se tomó una muestra por conveniencia en la cual se seleccionaron 6 empresas del sector textil-confección en la ciudad de Cúcuta, con la condición de que los sujetos participantes en el estudio cumplieran con los criterios de inclusión y exclusión.

2.2 Criterios de inclusión

Trabajadores que se encontraban vinculados en las Pymes del sector textil-confección en el periodo 2015-2017 de la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander.

2.3 Criterios de exclusión

Trabajadores que no hayan presentado ausentismo laboral en el periodo 2015-2017.

2.4 Recolección de la información

La información se obtuvo principalmente de los trabajadores, quienes por medio de una encuesta refirieron los datos acerca del ausentismo e incapacidades presentadas en el periodo de interés. Se realizó un muestreo por conveniencia y se analizó la documentación existente, incluido el registro de las incapacidades, recopilando la información concerniente a edad, género, cargo, antigüedad, tipo de contrato, turnos de trabajo, ausencias, días de mayor ausentismo laboral, entre otros, que se utilizaron como variables de estudio. El capítulo tiene fines descriptivos de la población antes referenciada, por lo tanto, no se hará ponderación de la información de ninguna variable y por consiguiente se puede incurrir en errores de selección [20].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización del ausentismo laboral

A partir de la investigación realizada el ausentismo laboral es reconocido por los trabajadores como una problemática para las empresas del sector textil-confección en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, la cual de acuerdo con algunos autores genera consecuencias negativas directas e indirectas en las organizaciones, en términos de costos, productividad, desgaste administrativo y recurso humano, y aunque el Gobierno Nacional de Colombia desde el año 2015 por medio del Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo No. 1072 [21], ha reglamentado el diseño e implementación del sistema de seguridad y salud en el trabajo, investigaciones como esta, muestran la necesidad de articular las medidas de prevención del ausentismo laboral con el control y seguimiento de las estadísticas de ausentismo laboral, al igual que la socialización de dichas medidas con los trabajadores.

- *Análisis sociodemográfico.* En el primer ítem del estudio se pudo observar que en las Pymes del sector textil-confección de la ciudad de Cúcuta en el periodo 2015-2017, el mayor índice de ausentismo laboral lo presentan los hombres con un 55.73%, seguido por las mujeres con un 44.27%. En este estudio se identificó una mayor proporción de hombres con ausentismo laboral, pero al realizar medidas de ajustes se observó que la diferencia entre ambas no es significativa, por lo cual no se puede establecer una relación directa entre el sexo y el ausentismo laboral. Seguidamente, se realizó el análisis de las edades de los trabajadores que presentaron ausentismo laboral (Figura 1), en donde se pudo observar que el mayor índice de ausentismo se presenta en los trabajadores entre los 24-29 años, seguido por los trabajadores entre los 30-35 años. Al realizar el análisis de las edades de los trabajadores que presentaron ausentismo laboral, se evidencia que la mayoría es una población joven inferior a los 35 años, lo contrario al precepto de a mayor edad mayor ausentismo laboral, dado por algunas enfermedades de base que puedan contraer las personas en la etapa adulta como diabetes, hipertensión, entre otras; o por la mayor probabilidad de riesgo de enfermedades laborales asociadas a las posturas incorrectas y prolongadas en las jornadas de trabajo. Los resultados obtenidos corresponden con lo reportado por [22] en donde la población con mayor ausentismo laboral se encuentra entre los 31-35 años de edad, dicha similitud puede estar asociada a que el rango de edades de los trabajadores encuestados se encuentra en su mayoría por debajo de los 35 años.

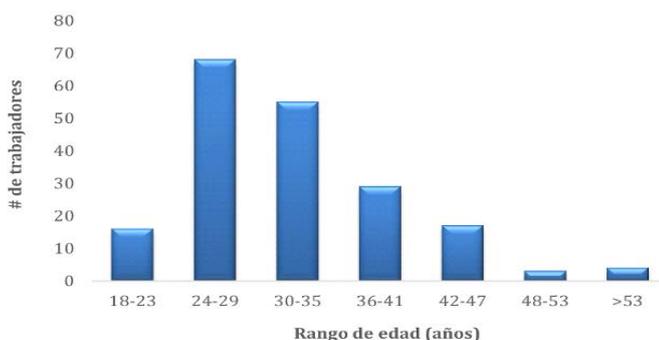


Figura 1. Histograma de edad de los trabajadores ausentados

De otra parte, se analizó el nivel educativo de los trabajadores de acuerdo al cargo que ocupan (Figura 2), donde se evidencia que el 68.8% del personal desarrolló estudios de secundaria y el 20.3% alcanzó estudios de primaria, tan solo el 2.6% de los trabajadores ausentados han realizado estudios a nivel tecnológico y profesional, cabe

anotar que, la investigación se aplicó solo al personal del área de producción. Con respecto al nivel de escolaridad, se observa que más del 88% de las personas que presentaron ausentismo laboral tienen bajo nivel de escolaridad, lo cual concuerda con las conclusiones establecidas en la investigación realizada en el Institución de Salud de Medellín [23], en donde el 82% de la población estudiada que presentó ausentismo laboral tenía un nivel educativo de bachiller, técnico o de menor grado. Una primera interpretación de este fenómeno podría ser la falta de concientización por parte de los trabajadores de nivel educativo básico sobre el impacto que el ausentismo laboral provoca, tanto en el aspecto económico personal como empresarial, ya que al ausentarse laboralmente por enfermedad común el salario disminuye, al igual que la producción de la empresa. Lo anterior, es reflejado en la investigación ya que los trabajadores manifiestan desconocer las medidas de prevención de ausentismo laboral implementadas.

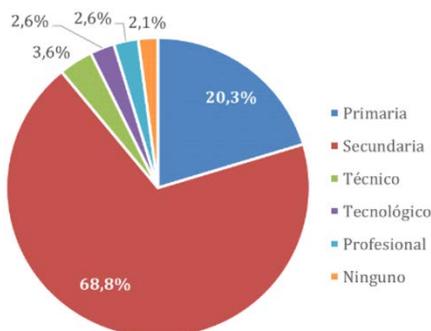


Figura 2. Nivel educativo de los trabajadores

Otro aspecto evaluado, fue la antigüedad de los trabajadores en las diferentes empresas incluidas en la muestra (Figura 3), dado que el período de análisis fue entre 2015-2017, los trabajadores seleccionados para la aplicación de la encuesta debían tener una antigüedad igual a superior a 2 años. En el análisis de este parámetro, se puede observar que el 71.3% del ausentismo laboral fue ocasionado por personas con la menor antigüedad en las empresas (2-4 años), seguido con un 21.3% por aquellos empleados que tienen entre 5-7 años de estar vinculados a las organizaciones. Con base en los resultados anteriores, se puede inferir que a mayor antigüedad de los trabajadores en las empresas se disminuye el índice de ausentismo laboral, lo cual puede estar asociado a que se reducen los accidentes laborales debido a que los empleados adquieren mayor habilidad y destreza en el manejo de los equipos, y por ende la curva de aprendizaje incrementa significativamente.

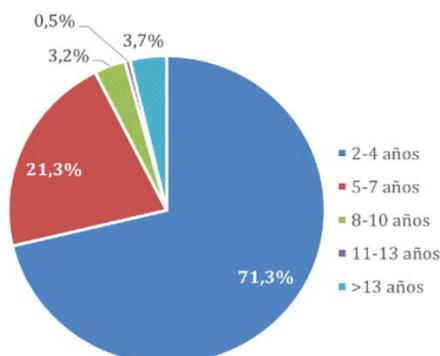


Figura 3. Antigüedad en la empresa

- **Tipología del ausentismo.** En cuanto a la frecuencia del ausentismo laboral, el mayor porcentaje de los trabajadores de las empresas del sector textil-confección se ausentaron de 1-5 veces (93.1%), mientras que el 6.4% se ausentó de 6-10 veces durante el período 2015-2017. El porcentaje restante (0.5%) corresponde a aquellos trabajadores que se ausentaron más de 10 veces. De otra parte, el mayor número de ausencias se dio en el año 2017 (38%), seguido por el año 2016 (34%) y por último el año 2015 (27%).
- **Causa del ausentismo laboral.** Se pudo identificar que el mayor índice de ausencias en el período 2015-2017 se dio a causa de enfermedades generales (55.3%), seguido de enfermedades laborales (33.5%) y, por último, a causa de accidentes de trabajo (11.2%) como se observa en la Figura 4. Siendo la enfermedad general o de origen común el motivo predominante del ausentismo laboral, similar a las conclusiones establecidas en el Segundo Informe de Seguimiento sobre Salud y Estabilidad en el Empleo [11], el cual refiere que la enfermedad general continúa siendo la principal causa de ausentismo laboral en las empresas colombianas. Asimismo, también se conoce que el ausentismo estuvo relacionado en un alto porcentaje con enfermedades laborales, un dato importante para futuras investigaciones. Cabe recalcar que, en el presente estudio solo se tuvieron en cuenta las ausencias generadas por causas médicas (enfermedad general, accidentes de trabajo o enfermedades laborales).

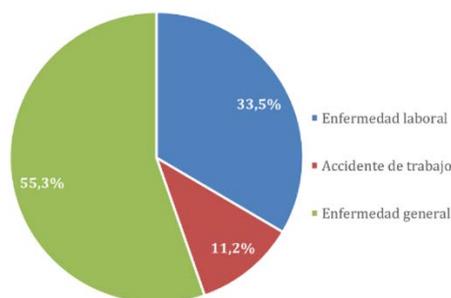


Figura 4. Causa del ausentismo laboral

- Patología causa del ausentismo.** Una vez identificada la causa del ausentismo laboral, se procedió a conocer la patología relacionada con el ausentismo (Figura 5), en donde se puede observar que en correspondencia con la figura anterior, las dos razones que más aquejan a los trabajadores es la virosis con un 30.5% y el dolor estomacal (i.e. infecciones gastrointestinales, gastritis) con un 17.6%, las cuales se connotan como enfermedades de origen común o general, y son producto usualmente de cambios drásticos en el ambiente y consumo de alimentos o bebidas no inocuas, malos hábitos alimenticios o estrés, respectivamente. Así mismo, se evidencia otra causa importante de origen laboral que ocasiona el 23% de incapacidades laborales, como el dolor muscular (i.e. dolor de columna, lumbago, dolor de espalda), resultado de las malas posturas, movimientos inadecuados y levantamiento de cargas incorrecto en el sitio de trabajo. Por lo tanto, se propuso una serie de recomendaciones que permitan direccionar las actividades de promoción y prevención al control del ausentismo laboral en el sector textil-confección.

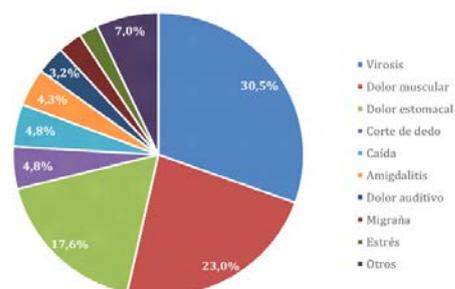


Figura 5. Patología causa del ausentismo

- Sistema corporal afectado.** Las patologías evaluadas traen consigo afectaciones a los diferentes sistemas corporales de los trabajadores. En la Figura 6 se puede visualizar que el sistema respiratorio es el de mayor afectación con un 34.4%, lo cual está directamente relacionado con las patologías analizadas anteriormente como la virosis, esto puede ser por enfermedades de base de los trabajadores, tales como sinusitis o rinitis, o por virus respiratorios altamente infecciosos como la gripa. Seguidamente se encuentra el sistema osteomuscular con un 29.5% de impacto, aquí se enmarcan los lumbagos, dolores de espalda y columna, referenciados anteriormente, causados probablemente por malas posturas, manejo inadecuado de cargas o condiciones propias del trabajador. Dichos resultados están alineados con el estudio de Kury [22] quien manifiesta que los motivos del ausentismo laboral en la industria manufacturera de Honduras fueron en primer lugar por alteraciones respiratorias y en segundo lugar por alteraciones musculo-esqueléticas. De otra parte, el sistema que presenta el menor índice de afectación es el auditivo con un 3.2%, debido probablemente a que en el sector textil-confección los trabajadores no están expuestos a niveles de ruido muy elevados.

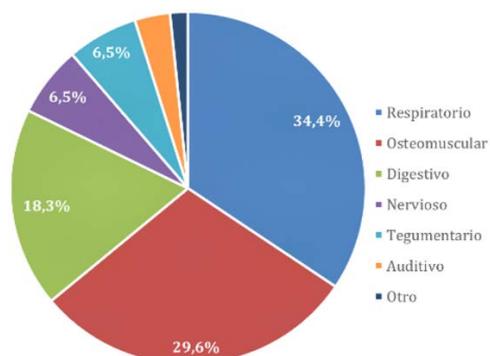


Figura 6. Sistema corporal afectado

- Rol laboral con mayor índice de ausentismo.** Dentro del estudio, se evaluó el ausentismo laboral reportado por cada cargo según muestra la Figura 7. Encontrando que los auxiliares presentan el mayor índice de ausentismo,

su función está relacionada principalmente con actividades administrativas. Los operarios con contrato rotativo y fijo, ocupan el segundo y tercer lugar, respectivamente; sus tareas esencialmente se enfocan en el proceso de confección de prendas de vestir. Los trabajadores que reportan el menor índice de ausentismo con un 2.1% se encuentran a nivel directivo, encargados principalmente del liderazgo y gerencia de procesos. Los resultados anteriores indican que las estrategias a implementar para reducir el ausentismo laboral en las Pymes deben enfocarse principalmente en los cargos a nivel auxiliar y operativo, los cuales representan el 92.1% del ausentismo laboral en el sector textil-confección.

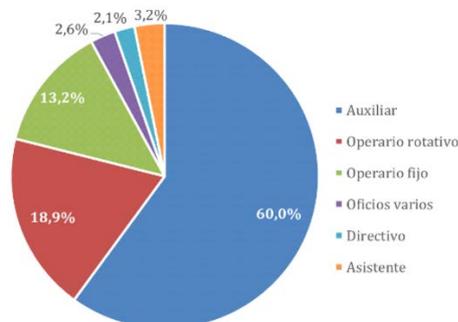


Figura 7. Rol laboral con mayor índice de ausentismo

- Parte afectada por accidente laboral.* Una de las variables investigadas como promotora del ausentismo es el accidente laboral, la cual es producto de las funciones y tareas asignadas a cada cargo, por ende es muy importante conocer cuales son las zonas del cuerpo más vulnerables y con mayor índice de afectación para tomar las medidas de control en el entorno, los procesos, las herramientas y la personas, con el fin de mitigar el riesgo de daño en la salud de los trabajadores. Según la Figura 8, se evidencia que la parte del cuerpo más afectada es la mano con un 25.6%, seguida por la espalda con un 17.9%. El primer dato se debe a que en el sector textil-confección las operaciones que realizan los trabajadores en su mayoría son manuales, o aquellas que se encuentran mecanizadas exigen una interacción alta entre hombre-máquina para su manejo y control, lo que redundaría en un aumento en el riesgo de accidentes laborales que impacten directamente las manos. Respecto a la espalda como se expuso anteriormente, esta zona del cuerpo se ve seriamente afectada por la manipulación incorrecta de cargas sumado al uso incorrecto o no uso de elementos de protección personal. En otro sentido, las partes con menor índice de afectación por los accidentes laborales son el hombro y la cadera, cada una con un 2.6% de participación sobre el ausentismo general evaluado en el período 2015-2017.

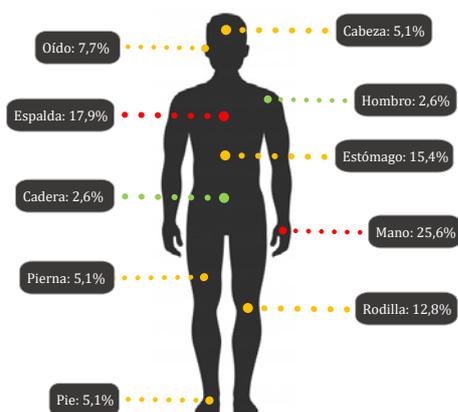


Figura 8. Parte afectada por accidente laboral

Finalmente, en las Pymes del sector textil-confección se pudo observar que el 87.5% de los empleados encuestados consideran que el ausentismo es un problema para la organización, mientras que el 12.5% considera lo contrario. También se denota que solo el 41.67% de los empleados conocen los medios de control implementados por la empresa para prevenir el ausentismo laboral. Es decir que, aunque la mayoría de los empleados consideren este fenómeno como un problema en la empresa, la mayoría no conoce los medios de control o prevención para este hecho que se presenta constantemente en las empresas del sector textil-confección, esto puede ser producto posiblemente de un sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo mal implementado o inexistente.

3.2 Estrategias para la mitigación del ausentismo laboral

Para determinar las acciones necesarias para controlar el ausentismo laboral por causa médica en el sector textil-confección, se realizó la construcción de un plan de acción orientado de acuerdo con las principales causas de ausentismo e involucrando la relación con las afectaciones o enfermedades priorizadas para su control. Dicho plan consiste en la propuesta de tres (3) estrategias de trabajo referidas en la Figura 9.



Figura 9. Estrategias para la mitigación del ausentismo laboral

- Estrategia 1: Prevención y control de Desórdenes Músculo-Esqueléticos (DME).** Los desórdenes músculo-esqueléticos, son señalados por el Instituto Nacional para la Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH) como un grupo de condiciones que involucra nervios, tendones, músculos y estructuras de soporte como los discos intervertebrales [24], y están asociados con diversos factores del trabajo como la manipulación de cargas, las posturas forzadas, los movimientos repetitivos, las neuropatías por presión o por trabajos desarrollados en ambientes fríos o los factores de riesgo psicosocial [25]. De acuerdo a las actividades laborales realizadas por el área de producción del sector textil-confección se concluye que las exigencias físicas más habituales son los movimientos repetitivos de manos o brazos y la adopción de posturas dolorosas o fatigantes. Los problemas de salud van desde la incomodidad, molestias y dolores menores a trastornos más graves que requieren la incapacidad temporal y el tratamiento médico. En la Tabla 1 se resumen las recomendaciones propuestas para esta estrategia, basado en la Guía de atención integral basada en la evidencia para dolor lumbar inespecífico y enfermedad discal relacionados con la manipulación manual de cargas y otros factores de riesgo.

Tabla 1. Estrategia 1. Prevención y control de desórdenes músculo-esqueléticos

Tarea	Actividad	Tiempo de Ejecución
1. Aplicación de examen físico con énfasis osteomuscular en los exámenes ocupacionales y radiografía de columna lumbosacro cuando aplique	1.1 Examen de ingreso	Corto y mediano plazo
	1.2 Examen periódico	
	1.3 Examen de egreso	
2. Capacitación en manejo de cargas	2.1 Charlas, talleres, videoconferencias, mailing, folletos	Mediano plazo
3. Capacitación en higiene postural	3.1 Charlas, talleres, videoconferencias, mailing, folletos	Mediano plazo
4. Sensibilización en el uso adecuado de herramientas de trabajo	4.1 Charlas, talleres, videoconferencias, mailing, folletos	Mediano plazo
5. Análisis de puesto de trabajo	5.1 Realización de análisis del puesto de trabajo del personal con exposición alta al riesgo biomecánico	Mediano plazo
	6.1 Análisis tiempo de exposición al riesgo biomecánico	
6. Análisis jornada laboral	6.2 Análisis jornada laboral y rotación del personal	Mediano y largo plazo
	6.3 Fomento pausas activas	

- Estrategia 2: Cultura del autocuidado.** De acuerdo con Figueredo, *el cuidado a la salud de sí mismo o autocuidado es el comportamiento del individuo para establecer y conservar la propia salud por medio del desarrollo de acciones de promoción de la salud y prevención de enfermedades para su propio beneficio. Estas acciones incluyen cuidados con la higiene, la alimentación, estilos de vida, factores ambientales y factores socioeconómicos* [26]. En salud, su promoción para una cultura de autocuidado se realiza a través de campañas de comunicación y programas específicos; su vigilancia debe considerar indicadores como los días laborados sobre los totales, el registro e investigación de los riesgos de trabajo y los exámenes médicos de ingreso, periódicos y específicos necesarios de acuerdo con la exposición [27], según la Organización Internacional del Trabajo (OIT). En la Tabla 2 se realiza un resumen de la propuesta diseñada.

Tabla 2. Estrategia 2: Cultura del Autocuidado

Tarea	Actividad	Tiempo de ejecución
1. Aplicación de exámenes médicos ocupacionales	1.1 Examen de ingreso	Corto y mediano plazo
	1.2 Examen periódico	
	1.3 Examen de egreso	
2. Diagnóstico de condiciones de salud	2.1 Aplicación de una encuesta para la caracterización del perfil sociodemográfico.	Corto plazo
	2.2 Solicitud del informe general de las condiciones de salud a la IPS encargada del punto 1.	
3. Sensibilización en seguridad basada en el comportamiento	3.1 Charlas, talleres, videoconferencias, mailing, folletos	Mediano Plazo
4. Prevención accidentes comunes y enfermedades infectocontagiosas	4.1 Autoreporte de las condiciones de salud	Mediano Plazo
	4.2 Aplicación normas básicas de bioseguridad	
	4.3 Capacitación en identificación de peligros, evaluación y control de riesgos	
	4.4 Prevención en accidentes comunes: caídas, cortes, golpes, quemaduras, entre otros	

- *Estrategia 3: Estilo de vida saludable.* El estilo de vida se ha definido como el conjunto de pautas y hábitos comportamentales cotidianos de una persona y como aquellos patrones de conducta individuales que demuestran cierta consistencia en el tiempo, bajo condiciones más o menos constantes y que pueden constituirse en dimensiones de riesgo o de seguridad dependiendo de su naturaleza [28]. A continuación, se relacionan las actividades recomendadas para la disminución y control del ausentismo laboral en las empresas:
 - Sensibilización en nutrición y los beneficios de comer saludable.
 - Fomento en pausas activas y gimnasia mental.
 - Aplicación de jornadas de relajación y actividad física.
 - Sensibilización sobre la importancia de la higiene del sueño.
 - Promoción al NO consumo de sustancias psicoactivas (alcohol, tabaco, drogas).
 - Herramientas para una buena salud mental.

4. CONCLUSIONES

La investigación permitió conocer que el ausentismo laboral en su mayoría es justificado por causas médicas. Encontrando que el mayor índice de ausentismo lo presentan los hombres con un 55.73% seguido por las mujeres con un 44.27%, esto discute los resultados de diferentes investigaciones donde resaltan que el sexo femenino presenta una mayor tasa de ausentismo laboral. Asimismo, se evidenció que el mayor índice de ausentismo se presenta en los trabajadores entre los 24-29 años, seguido por los trabajadores entre los 30-35 años. Al realizar el análisis de las edades de los trabajadores que presentaron ausentismo laboral, se determina que la mayoría es una población joven inferior a los 35 años. Contrastando también otros estudios que refieren que el ausentismo laboral es directamente proporcional a la edad de los trabajadores, debido a enfermedades de base que puedan contraer las personas en la etapa adulta como diabetes, hipertensión, entre otras.

También se pudo identificar que el mayor índice de ausencias en el período 2015-2017 se dio a causa de enfermedades generales (55.3%), seguido de enfermedades laborales (33.5%) y, por último, accidentes de trabajo (11.2%). Se determinó que la patología causal de mayor frecuencia de ausentismos en las empresas del sector textil-confección de Cúcuta, es la virosis (30.5%) que hace parte de las enfermedades generales. Seguida por el dolor muscular con un 23%, en este ítem se combinaron patologías como dolor de columna, lumbago y dolor de espalda. En correspondencia con las patologías, los sistemas corporales más afectados son el sistema respiratorio y el sistema osteomuscular, con un índice de afectación del 34.4% y 29.6%, respectivamente. El impacto sobre el primer sistema está contemplado en la matriz de riesgos de las empresas que identifica como foco de contagio los causantes bioquímicos (ej. partículas orgánicas, virus); respecto al componente osteomuscular usualmente se ve afectado por malas posturas, movimientos inadecuados y levantamiento de cargas incorrecto en el lugar de trabajo, para lo cual las empresas en cumplimiento de la normatividad legal vigente han creado programas de prevención para el manejo de malas posturas en los puestos de trabajo (ej. corte, costura, producto terminado).

Cabe destacar que desde el año 2017 el estado ha venido exigiendo el cumplimiento del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo, y resaltando la importancia que las diferentes áreas de las organizaciones se involucren con el mismo. El estudio demuestra que solo el 41.67% de los empleados conocen los medios de control de la empresa para la mitigación del ausentismo laboral, lo cual denota la necesidad de un mejoramiento de los procesos de comunicación y sensibilización al personal operativo sobre las herramientas y estrategias dispuestas por las empresas para cuidar la salud y seguridad de los trabajadores, lo que redundaría directamente en un mejoramiento de la productividad y competitividad del sector textil-confección. Finalmente, se hace necesario continuar en la línea de las investigaciones respecto al ausentismo laboral en este sector económico en la región y el país, incorporando otras características individuales de los trabajadores, del ambiente físico y el ambiente organizacional, factores influyentes en el ausentismo que permiten contribuir al diseño de estrategias que repercutan de manera positiva al desarrollo y mejoramiento de la industria textil.

REFERENCIAS

- [1] Morales, F. (2018). Acsendo.blog. Recuperado: <https://blog.acsendo.com/ausentismo-laboral-diana-escobar/#:~:text=El%20ausentismo%20laboral%20es%20entendido,recurrente%20en%20el%20mundo%20laboral>.
- [2] Porter, M. (2009). Ser competitivo. Deusto.
- [3] Ferro, C., García, A. y Lareo, B. (2014). Determinantes del absentismo laboral según enfoque sociológico. Caso: empresa auxiliar automoción. *Revista Venezolana de Gerencia*, 19(68), 575-597.
- [4] Mendinueta, M., Herazo, Y. y Palacio, E. (2017). Estudios de casos en seguridad y salud en el trabajo: Una experiencia de formación en investigación. Universidad Simón Bolívar.
- [5] Sánchez, D. (2015). Ausentismo Laboral: Una visión desde la gestión. *Revista salud Bosque*, 5(1), 43-54.
- [6] Nova, P. (2000). El absentismo laboral como indicador de unas deficientes condiciones de trabajo. *Cuadernos de relaciones laborales*, 9, 229-239.
- [7] Arregui, A. (2018). El ausentismo laboral. Caso: Área Call Center institución financiera privada del Ecuador. Tesis de maestría. Universidad Andina Simón Bolívar.

- [8] Guerrero, E. et al. (2018). Factores de riesgo psicosocial, estrés percibido y salud mental en el profesorado. *Psychosocial risk factors, perceived stress and mental health in teachers. Revista Clínica Contemporánea*, 9(e2), 1-12.
- [9] Danatro, D. (1997). Ausentismo laboral de causa médica en una institución pública. Montevideo 1994-1995. *Rev. méd. Urug*, 101-109.
- [10] Martínez, E. y Saldarriaga, J. (2008). Inactividad física y ausentismo en el ámbito laboral. *Revista de salud pública*, 10, 227-238.
- [11] Arrieta, E. et al. (2017). Segundo informe de seguimiento sobre salud y estabilidad en el empleo. Centro de Estudios Sociales y Laborales.
- [12] Semana. (2019). La Industria textil va con toda. Recuperado: <https://www.semana.com/hablan-las-marcas/articulo/la-industria-textil-va-con-toda/616306>.
- [13] FASECOLDA. (2017). Indicadores de gestión. Recuperado: <https://fasecolda.com/fasecolda/estadisticas-del-sector/indicadores-de-gestion/>.
- [14] García, C. (2018). En el 2017, cada día se accidentaron 1.800 personas en su trabajo. *El Tiempo*. Recuperado: <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/panorama-de-los-accidentes-de-trabajo-en-colombia-en-2017-189464>.
- [15] Portafolio. (2018). Personas entre los 20 y 29 años, los que más se incapacitan en el país. Recuperado: <https://www.portafolio.co/tendencias/panorama-de-las-incapacidades-en-colombia-523479>.
- [16] La Opinión. (2017). Industria textil de Cúcuta presente en Colombiatex. *La Opinión*. Recuperado: <https://www.laopinion.com.co/economia/industria-textil-de-cucuta-presente-en-colombiatex-126609>.
- [17] Balestrini, M. (2000). Como se elabora un proyecto de investigación. Consultores Asociados.
- [18] Hurtado, J. (2006). El proyecto de investigación: Metodología para la investigación holística. Quirón.
- [19] Ortiz, F. (2004). Diccionario de metodología de la investigación científica. Limusa.
- [20] Cuevas, Y., Villa, M. y García, T. (2011). Caracterización del ausentismo laboral en un centro médico I Nivel. Tesis de maestría. Colegio Mayor Nuestra Señora del Rosario.
- [21] Presidencia de la Republica. (2015). Decreto 1072 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo. Colombia.
- [22] Kury, D. (2012). Ausentismo laboral en trabajadores de la industria manufacturera Villanueva - Honduras. Trabajo de grado. Universidad Autónoma de Nicaragua.
- [23] Cataño, E., Correa, E. y Berbesi, D. (2017). Factores asociados al absentismo laboral en los empleados de una institución de salud de Medellín. Colombia. *Medicina y seguridad del trabajo*, 63(249), 311-318.
- [24] Rincones, A. y Castro, E. (2016). Prevención de desórdenes musculoesqueléticos de origen laboral en Colombia: Un estudio de futuro para el año 2025. *Revista Ciencias de la Salud*, 14, 45-56.
- [25] Ramírez, P. (2018). Prevención de enfermedades Musculo Esqueléticas. Universidad Nacional Abierta y A distancia.
- [26] Figueredo, W. (2008). Masculinidades e Cuidado: Diversidade e necessidades de saúde dos homens na Atenção Primária. Dissertação doutoral. Universidade de São Paulo.
- [27] Anaya, A. (2017). Modelo de Salud y seguridad en el trabajo con gestión integral para la sustentabilidad de las organizaciones. *Ciencia & trabajo*, 19(59), 95-104.
- [28] Sánchez, M. y Luna, E. (2015). Hábitos de vida saludable en la población universitaria. *Nutrición hospitalaria*, 31(5), 1910-1919.

Qué es y cómo se ha estudiado el emprendimiento social: Análisis de tendencias y revisión sistemática de la literatura

Natalia Valentina Castro Jiménez
Ruth Alejandra González Serna
Lizeth Fernanda Serrano Cárdenas
Universidad Católica de Colombia
Colombia

El emprendimiento social se ha convertido en una iniciativa que fortalece el desarrollo social, mitigando el impacto de los retos sociales que los gobiernos no han logrado solucionar o han desatendido. Este tipo de modelos de negocio han surgido para luchar contra la exclusión social, rehabilitar zonas vulnerables, generar empleo, ofrecer productos y servicios innovadores; y en general, producir ingresos económicos a la vez que se genera valor social. A pesar de la relevancia del emprendimiento social, aún el concepto es difuso y encontrar convergencias en la literatura sobre su definición es complejo, esto se traduce en una particular complejidad para llevarlo de la teoría a modelos de negocio sostenibles y rentables en el campo práctico. Dado lo anterior, el objetivo de esta investigación fue profundizar en la comprensión del concepto a partir del desarrollo de un ejercicio sistemático y riguroso de revisión de literatura, dónde cuerpos de conocimiento teóricos fueron analizados para generar conclusiones en relación con las convergencias y divergencias de los autores. A la vez, se realizó un análisis de tendencias sobre el campo de conocimiento, estudiando indicadores cómo: dinámica de publicación por país, autores importantes, dinámica de publicaciones en el tiempo y correlación entre las palabras más utilizadas en la investigación sobre emprendimiento social. Se espera que este estudio genere dos aportes: a nivel teórico, que se utilice como punto de partida para que investigadores continúen profundizando en el campo partiendo de la comprensión de su concepto; a nivel práctico, se espera que los emprendedores sociales encuentren en esta investigación un insumo para la construcción de modelos de negocio que aborden el enfoque social.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, y especialmente en países como Colombia, la crisis económica de los últimos años [1], ha generado impactos negativos en diferentes sectores económicos, afectando, como consecuencia, la calidad de vida de la población y traducándose en un aumento en la pobreza en distintas regiones [2]. A tal punto, que el ingreso de una persona no alcanza para adquirir la canasta mínima de alimentos y otros bienes necesarios [3, 4]. En esta dinámica, el emprendimiento, más específicamente, el emprendimiento social, se ha convertido en un mecanismo para detectar oportunidades de negocio y hacer que, a través de estas, se pueda transformar gradualmente la vida de los individuos y, por ende, de la sociedad [5].

En Colombia, el concepto de emprendimiento social, pareciera reciente, pero contrario a lo expuesto, el estudio del emprendimiento social tuvo sus inicios en los años 80, donde se abordó con mayor énfasis desde la perspectiva económica [6]. En la actualidad, los estudios sobre el emprendimiento social han integrado para su comprensión dimensiones psicológicas y sociales. Bajo este concepto, el emprendimiento se ha comprendido cómo la oportunidad de descubrir soluciones que generen rentabilidad desde la dimensión económica [7], a la vez que se generan efectos en las dimensiones sociales. Desde este tipo de modelos de negocio, no sólo se pretende la obtención de beneficios económicos, sino que se promueve la realización de un proyecto sostenible que favorezca a una comunidad o genere una respuesta ante una demanda social específica. Esto, sin necesidad de que la propuesta empresarial se desarrolle desde una organización pública o una fundación. Este particular enfoque ha generado que el emprendimiento social sea cada vez más relevante, en escenarios dónde se requiere innovación y transformación en temas asociados con el medio ambiente, la salud, la educación, entre otros aspectos, que en conjunto contribuyen a la reducción de la pobreza y a la mejora de la calidad de vida de la sociedad [8].

En la actualidad existen un sin número de desafíos, para lograr la generación de impacto social, es en este contexto, que el emprendimiento social ha creado nuevos escenarios de las compañías, generando una oportunidad para que los emprendedores desarrollen iniciativas de negocio dónde la generación de contribuciones en esta dimensión sea el principal enfoque de su propuesta de valor. Dado lo anterior, el auge del emprendimiento social presenta una tendencia ascendente, con proyectos inspiradores en los que se fusiona la innovación, la tecnología y la sostenibilidad [9]. En específico, se identificó que desde este enfoque se pretende generar soluciones de transformación en temas de alimentación saludable, agricultura sostenible, economía colaborativa, reciclaje para preservar el planeta y educación para todos, entre otras áreas priorizadas. Sin embargo, a pesar de su relevancia, los retos que presenta este tipo de emprendimientos son numerosos [10], donde se destaca la falta de información sobre cómo desarrollar estas iniciativas desde una visión sostenible.

Esta ausencia de información, se explica en lo difuso del concepto en la literatura y, por tanto, en su complejidad de materializarse en la práctica. Pese a lo anterior, es cada vez más relevante continuar desarrollando investigaciones que profundicen en el campo de conocimiento, favoreciendo que se generen nuevos modelos de negocio con este enfoque, a la vez que se desarrollan programas y políticas públicas que favorezcan su replicabilidad desde diferentes sectores económicos de los países [11]. En particular, se encuentra que Colombia presenta retos importantes en términos de investigación sobre emprendimiento social analizando sus prácticas y referentes. Por tal razón, se

encuentra la necesidad de desarrollar estudios rigurosos y estructurados que aborden esta necesidad y que contribuya a analizar los determinantes para que estas iniciativas se potencien en el país. [12]. Lo anterior, bajo la premisa que los efectos que se generen de la creación de modelos de negocio de este tipo, no sólo generan beneficios individuales para los emprendedores, sino favorecen el desarrollo de nuevas alternativas para obtener beneficios colectivos [13]. Considerando lo anterior, esta investigación tuvo como propósito profundizar en la comprensión del emprendimiento social, desde una visión rigurosa desarrollada a partir de un ejercicio de revisión sistemática de literatura y un análisis de tendencias sobre el campo de conocimiento.

2. MÉTODO

La presente investigación obedece a un enfoque analítico en un nivel descriptivo, por cuanto se busca la comprensión del concepto de emprendimiento social desde una perspectiva rigurosa. Para el desarrollo de ejercicio, se siguió la metodología de revisión sistemática de literatura, que facilitó un procedimiento estructurada para lograr el cumplimiento de los propósitos de la investigación [14]. Se consideró como referente teórico a Tranfield [15], quién establece tres etapas para el desarrollo de ejercicios de revisión sistemática, Planeación, Ejecución y Reporte de Resultados. Estas etapas se presentan en la Figura 1.

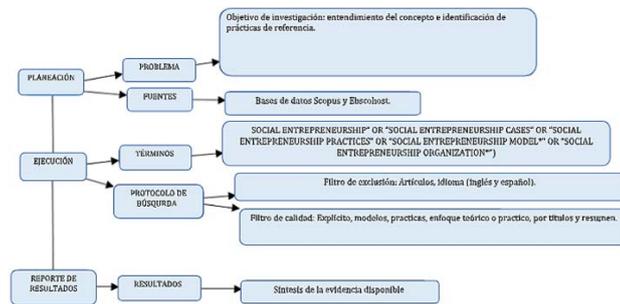


Figura 1. Estructura Metodológica de la Investigación

2.1 Planeación de la revisión

En esta etapa, se definieron los propósitos de investigación. En coherencia con estos propósitos, se estructuraron los criterios de inclusión y exclusión: tipo de documento, artículos; idiomas de publicación, español e inglés; período de publicación para SCOPUS 2004-2019 y EBSCOhost del 2010- 2019, se definió como criterio de calidad: artículos que tuviesen una aproximación teórica que favorecieran la comprensión del concepto y artículos que documentaran casos de estudio, que facilitarían la identificación de prácticas de referencia sobre modelos de emprendimiento social implementados. Igualmente, se seleccionaron las bases de datos multidisciplinares SCOPUS Y EBSCOhost como fuente de información para la aplicación de dichos filtros. Se diseñó una ecuación de búsqueda que permitió priorizar la información en las bases de datos consultadas. Utilizando conectores booleanos que permitieron darle a la búsqueda un orden lógico, se conectaron palabras clave asociadas a los objetivos de investigación. El proceso antes descrito se presenta de forma gráfica en la Figura 2.

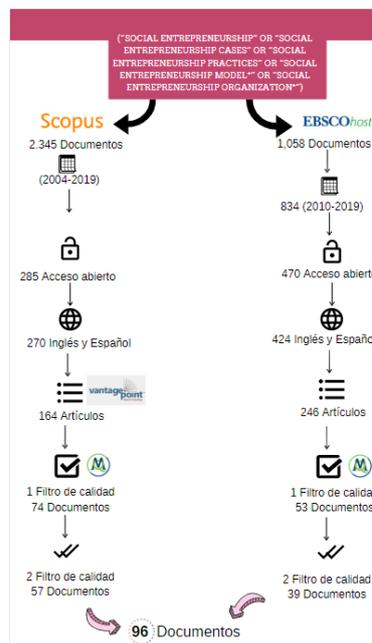


Figura 2. Selección de documentos analizados siguiendo la metodología de revisión sistemática de la literatura

2.2 Ejecución de la revisión

Para seleccionar los artículos a revisar en esta fase, se exploraron los resúmenes de los artículos encontrados con la ecuación de búsqueda. De esta manera, aplicando el criterio de calidad previamente definido, se filtraron aquellos artículos que generaban un aporte al propósito de investigación. Una vez seleccionados los documentos, se descargaron de las bases de datos y se revisó su texto completo, categorizando la información relevante a través del software de análisis cualitativo MAXQDA®, este ejercicio permitió agregar a la muestra otros documentos relevantes por *bola de nieve*.

En esta etapa, también se integró como parte del análisis la herramienta de minería de datos VantagePoint®. Este software facilitó el análisis descriptivo del campo de conocimiento a través de los indicadores bibliométricos: dinámica de publicación en el tiempo, dinámica de publicación por país y correlación entre palabras clave asociadas al campo de conocimiento. Para este análisis, sólo se procesaron los documentos obtenidos de la base de datos SCOPUS, dado que contenían una mayor de campos para dichos análisis. Una vez realizado el análisis descriptivo del campo de conocimiento, se hizo un análisis crítico de la literatura, respondiendo a los objetivos de investigación. La información recopilada permitió extraer y sintetizar los resultados relevantes de cada estudio como el concepto del emprendimiento social, su relación con las definiciones de emprendimiento, la relevancia del concepto y las limitaciones del mismo.

2.3 Reporte de resultados

En la última etapa, se consolidaron los resultados de forma rigurosa, a través de la identificación de formas de representación efectivas de la información y del análisis de convergencias y divergencias entre los autores estudiados en dicha literatura. Asimismo, se identificaron las brechas de la investigación y los retos sobre el estudio del tema, como aporte a las conclusiones e inferencias del estudio, donde a partir de lo extraído de la literatura se generaron recomendaciones sobre la aplicación práctica de los hallazgos. Estos resultados se presentan en los apartados subsecuentes de este documento.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis descriptivo del campo de conocimiento: Emprendimiento Social (ES)

3.1.1 Dinámica de publicación en el tiempo (2004- 2019)

Las publicaciones de los artículos relacionados con el ES, han tenido un crecimiento exponencial desde el año 2012, con algunas intermitencias (Figura 3). En este año, se abordaron temáticas específicamente relacionadas con el emprendedor social, con el estudio de modelos experimentales de negocios sociales [16] y con el análisis de los ciclos de vida particulares de este tipo de emprendimientos [17].

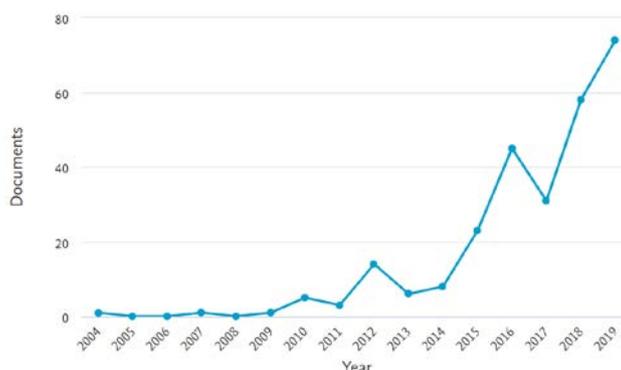


Figura 3. Dinámica de publicación sobre Emprendimiento Social en la Bases de datos SCOPUS (2004-2019)

Se evidenció, que para el año 2018, las publicaciones de ES casi se duplicaron, pasando de ser 31 artículos en el año 2017, que abordaban temas de comparación de emprendimiento social con el emprendimiento tradicional [18] y dónde se estudiaban sus respectivos mecanismos de creación [19]; a 58 publicaciones en 2018, buscando un especial énfasis en la comprensión de los retos de implementación de este concepto en geografías específicas, como es el caso de la investigación de Racolta [20], que analizó este tema en Rumanía, bajo la premisa que el ES se desarrolla apalancado por profundas raíces dentro de los ecosistemas de innovación que se fomentan en los territorios. Los resultados de este estudio, están alineados con lo que encontraron Velázquez y Bielous [21], dónde a partir del análisis en detalle la naturaleza de los emprendimientos sociales innovadores usando un estudio de caso exploratorio, concluyeron que el carácter innovador de los emprendimientos con este enfoque lejos de estar explicados por la integración de la tecnología, estaban justificados tanto en las características particulares de los emprendedores que

los lideraban como en las características propias del ecosistema de operación de dichos modelos de negocio. Esto evidencia uno de los grandes retos del emprendimiento social, soportarse en ecosistemas sólidos que favorezcan su continuidad, su desarrollo y, en consecuencia, la emergencia de más iniciativas que aborden retos sociales.

En el año 2019, se generó la mayor cantidad de documentos en toda la línea de tiempo estudiada, 74 publicaciones sólo en la base de datos SCOPUS, demostrando la importancia que desde la investigación se ha asignado a dicho concepto. Se evidenció que, en este año, las publicaciones se orientaron a favorecer la consolidación de un discurso más universal sobre el concepto, ejemplo de ello, es el estudio comparativo de la forma en cómo se ha abordado el ES en Rusia en relación con las perspectivas internacionales sobre el mismo [22]. En contraste, se identificó el especial énfasis por la identificación de alternativas para hacer del ES un ejercicio que comprenda las particularidades de los territorios, evidenciando que se requiere de una visión amplia del concepto, pero que, a su vez, se hace necesaria la comprensión de los retos de su aplicación en sectores, comunidades y regiones específicas.

Tal es el caso de la investigación desarrollada por Živojinović, Ludvig y Hognl [23], quienes estudiaron en detalle las características particulares de los emprendimientos sociales desarrollados en áreas rurales de Serbia. Dónde, como pasa en países como Colombia y otros de Latinoamérica, se mantienen entornos institucionales inestables que favorecen la persistencia de desafíos como la pobreza, las brechas de desigualdad, los problemas ambientales y la migración, problemas que requieren respuestas nuevas y creativas que a menudo no son proporcionadas por los gobiernos; y que, por ende, demandan de los emprendedores sociales intervenciones desde este enfoque.

3.1.2 Dinámica de publicación por país

La distribución de las publicaciones sobre ES se presenta en la Figura 4, allí, se hace evidente que los países que más publicaciones tienen al respecto son Estados Unidos (43 publicaciones), Reino Unido (27 publicaciones) y España (24 publicaciones), con especial énfasis en el desarrollo de estudio de casos sobre empresas sociales cuyo objetivo es generar un impacto en la sociedad bajo esquemas de negocio, rentables y sostenibles [24] [25]. En contraste, se encuentra que en los países de Latinoamérica aún el interés investigativo en este campo no ha sido tan amplio como se esperarían, pero que se han generado contribuciones desde Brasil, México y Colombia. En este último, se destaca la contribución de Arias y Arango-Botero [26], quienes desarrollaron un modelo de evaluación de impacto del emprendimiento social integrando un ejercicio riguroso de análisis que les permitió priorizar las variables clave para lograr dicho objetivo.

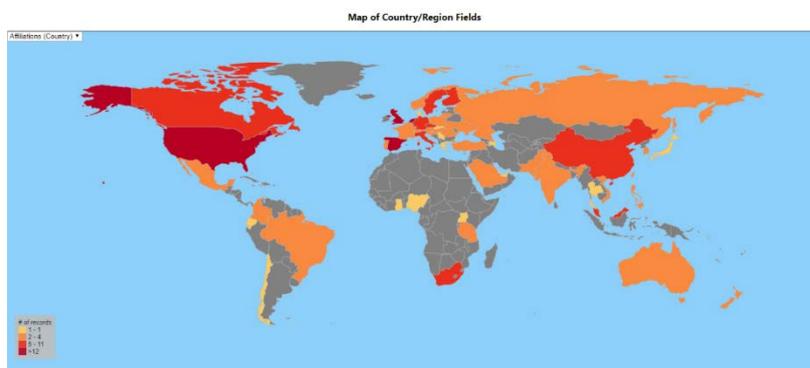


Figura 4. Dinámica de publicación por país sobre emprendimiento social.

3.1.3 Relación entre palabras clave asociadas al campo de conocimiento

Para este análisis, se construyeron tres mapas. El primero, denominado mapa de palabras, permitió evidenciar cuáles eran las palabras clave más relevantes en el campo de conocimiento, validando así hacia cuáles conceptos estaban direccionadas las tendencias investigativas en ES. Los dos últimos, denominados adunas o mapas de relaciones, permitieron evidenciar cómo las palabras clave empleadas por los autores en las publicaciones objeto de análisis de la base de datos SCOPUS se relacionaban entre sí, permitiendo encontrar asociaciones clave y relaciones de interés en el campo de investigación.

En la Figura 5, se presenta el mapa de palabras sobre el campo del ES, allí el tamaño de la palabra representa la cantidad de documentos en la base de datos estudiada que contienen dicho término, así, en cuanto mayor sea este tamaño, más relevante será este concepto en las investigaciones estudiadas. De esta forma, se evidencia que el estudio del emprendimiento social ha estado orientado a contrastar los de mecanismos tradicionales de responsabilidad social con los nuevos retos que implica el paradigma de emprendimiento social, dónde el enfoque en el centro de modelo de negocio es la creación de valor compartido, valor económico en simultáneo con el valor social; sin percibir dichos modelos de forma separada. La red SEKN [27] ha definido estos dos tipos de valor así: La creación de valor económico consiste en la identificación de oportunidades, en donde los beneficiarios del valor creado están dispuestos a pagar un precio por él que es superior al costo de producirlo, por lo que se genera riqueza material; mientras, la

3.2 Del emprendimiento al emprendimiento social

Para la comprensión del emprendimiento social, se hace necesario el entendimiento de cómo este se construye desde su categoría genérica: emprendimiento, es así como en este apartado se profundizó en esta relación, dado que los dos surgen ante el reto de superar los constantes y crecientes problemas económicos, así como lograr independencia y estabilidad económica para quienes deciden liderarlos.

En dinámicas de desempleo y baja calidad de este, se genera la necesidad de que las personas generen sus propios recursos, con negocios propios, pasando de ser empleados a ser empleadores [28, 29]. Es en esta necesidad, dónde surge el emprendimiento. Así, este fenómeno se define, dentro de las múltiples acepciones que existen del mismo, como el desarrollo de un proyecto que persigue un determinado fin económico, político o social, entre otros, y que posee una cuota de incertidumbre y de innovación [30], este concepto ya evidencia relaciones entre el emprender y el resultado social de dicha iniciativa.

El emprendimiento ha sido comprendido también como una manera de pensar y actuar orientada hacia la creación de riqueza [31]. Es una forma de pensar, razonar y actuar centrada en las oportunidades [32] y manteniendo una visión gerencial sobre el proceso [33]. Según Castro, García y Adame [34], el autor Cantillon [35] fue uno de los primeros en relacionar el concepto de emprendimiento con las actividades económicas partiendo desde una clasificación de los agentes económicos en tres grupos: propietarios de la tierra, prestamistas y emprendedores.

Say [36] considerado uno de los padres del emprendimiento, por su parte, asocia este concepto con la persona que lo lidera: el emprendedor. Definiendo a este, como aquella persona comprometida con crear novedad, y le atribuye las características de conocimiento, perseverancia, y buen juicio para la toma de decisiones.

En coherencia con lo anterior, se ha planteado que, emprender requiere de entender la forma en la que se comporta e interactúan los procesos y el mercado, para que este conocimiento se traduzca en productos que logren satisfacer las necesidades de la demanda [37].

Al referirse al emprendedor, Schumpeter [38] encuentra que este es un agente de cambio económico, que implanta innovaciones en los mercados originando inestabilidad temporal en estos y a su vez, induciendo a un cambio estructural en la forma en cómo se desarrollan las actividades productivas.

Esta necesidad de contar con más emprendedores que lideren el cambio ha estimulado la investigación sobre las diferentes competencias necesarias para materializar el emprendimiento, algunos de los aportes de diversos autores [39, 40] convergen en la necesidad de contar con una profunda motivación por lograr que su iniciativa nazca, crezca y sobreviva. Una vez comprendido el contexto del emprendimiento y la relevancia de las capacidades del emprendedor, se hace necesario hacer énfasis en el emprendimiento social.

3.3 Profundizando en el concepto de emprendimiento social

En la revisión de literatura desarrollada se encontró que el emprendimiento social se ha entendido como la forma de generar un modelo de negocio orientado a la generación de valor tanto económico como social [41] impactando de forma positiva en la sociedad, al actuar sobre demandas y retos específicos de personas y comunidades para mejorar su calidad de vida [42-45].

Para lograrlo, los emprendedores, siguiendo a Guzmán Vásquez y Trujillo Dávila [46], desarrollan un proceso que va desde la construcción, la evaluación y la consecución de oportunidades.

Se identificó, que el emprendimiento social favorece cuatro aspectos clave: 1) Resolución de problemas, según [47] [47], ayuda a las personas a resolver situaciones locales y a dar satisfacción a sus necesidades, mediante arreglos ingeniosos y de forma creativa, en aspectos poco eficaces del mercado [47]; 2) Transformación: potencializa el progreso social y ayuda a que se mejore la calidad de vida de una sociedad [48]; 3) Innovación: facilita que las ideas se conviertan en realidad desde perspectivas diferenciadas para el cambio, que usualmente, implican asumir riesgos en escenarios no convencionales [49]; y finalmente, 4) Cambio económico: genera nuevas oportunidades de empleo y desarrollo económico para las ciudades dónde se inserta [50].

Para profundizar en el concepto de Emprendimiento Social, se analizó en una línea de tiempo, cómo este se ha abordado (Tabla 1). Allí, se encontró que, en un inicio, este fue entendido desde una perspectiva económica, pero en la medida de su desarrollo, su enfoque fue orientándose más a la transformación de los sistemas y prácticas que son las fuentes principales de la pobreza, el deterioro ambiental, entre otros.

Para recientemente, conceptualizarse bajo lógicas asociada a descubrir beneficios rentables que integren una visión social.

Tabla 1. Línea de tiempo sobre el desarrollo conceptual del Emprendimiento Social en la literatura

Autor	Definición
[51]	El emprendimiento social no se refiere a iniciar un negocio o volverlo más comercial. Se refiere a encontrar nuevas y mejores maneras de crear valor social.
[52]	Define <i>emprendimiento social</i> en términos generales que abarcan una variedad de iniciativas las cuales caen dentro de dos categorías. La primera, en el sector lucrativo, <i>emprendimiento social</i> abarca actividades que enfatizan la importancia de la participación social del sector privado, y los beneficios que corresponden a aquellos que <i>hacen el bien haciéndolo bien</i> . El segundo se refiere a las actividades que buscan enfoques más emprendedores en el sector no lucrativo para incrementar la efectividad organizacional y fomentar la sostenibilidad a largo plazo. (p. 1)
[53]	Emprendimiento social es el arte de perseguir simultáneamente un retorno financiero y uno social de la inversión. (p. 1)
[54]	El uso innovador de los recursos para explorar y explotar oportunidades que satisfagan una necesidad social de manera sostenible.
[55]	<i>Emprendimiento social</i> , definido como un enfoque profesional, innovador y sostenible de cambio sistemático que resuelve las fallas del mercado y capta oportunidades. El emprendimiento social se compromete con las organizaciones lucrativas y no lucrativas, y el éxito de sus actividades es medido ante todo por su impacto social. (p. 3)
[56]	Emprendimiento social es la construcción, evaluación y persecución de oportunidades para el cambio social transformativo llevado a cabo por individuos visionarios, apasionados y dedicados. (p. 49)
[57]	Una manera de definir <i>emprendimiento social</i> sería a través de lo que motiva a los actores, ej. Ellos quieren crear valor social y poner un mayor valor en su misión social que en la financiera. (p. 241). Otra manera de definir <i>emprendimiento social</i> sería a través de resultados: cualquiera que cree valor social duradero a través de actividades emprendedoras es un emprendedor social. (p. 241)
[58]	1) nosotros vemos el <i>emprendimiento social</i> como un proceso de creación de valor a través de combinar recursos de maneras novedosas; 2) estas combinaciones de recursos tienen la intención de explorar y explotar oportunidades para crear valor social a través de estimular el cambio social o la satisfacción de necesidades sociales; y 3) cuando es visto como proceso, el emprendimiento social involucra la oferta de servicios y productos, pero puede también referirse a la creación de una nueva organización. (p. 37)
[59]	Actividades innovadoras y efectivas que se enfocan estratégicamente en solucionar las fallas sociales del mercado y crear nuevas oportunidades para agregar valor social sistemáticamente usando un rango de recursos y formatos organizacionales para maximizar los impactos sociales y propiciar cambios. (p. 23)
[60]	El <i>emprendimiento social</i> es ejercido donde alguna persona o grupo: se dirige a crear valor social, exclusivamente o al menos de manera relevante; muestra una capacidad de reconocer y tomar ventaja de las oportunidades para crear ese valor; emplea innovación, que va desde la invención absoluta hasta adaptar la novedad de alguien más para crear y/o distribuir valor social; está dispuesto a aceptar un riesgo mayor al promedio en crear y difundir valor social; y es inusualmente ingenioso para ser relativamente impávido sobre los recursos escasos en la persecución de su plan social. (p. 64)
[61]	Implica innovación diseñada explícitamente para mejorar el bienestar social; albergado en las organizaciones emprendedoras que inician estos niveles de cambio en la sociedad. (p. 247)
[62]	El <i>emprendimiento social</i> se esfuerza por lograr la creación de valor social y esto requiere la demostración de innovación, proactividad y administración del riesgo. Este comportamiento está limitado por el deseo de conseguir la misión social y mantener la sostenibilidad de la organización existente.
[63]	El <i>emprendimiento social</i> se refiere al proceso relacionado al descubrimiento de oportunidades para crear valor social y el proceso organizacional desarrollado y empleado para alcanzar ese fin. (p. 12)
[64]	El <i>emprendimiento social</i> es el proceso de aplicar los principios de negocios y emprendimiento a los problemas sociales. (p. 451)
[65]	<i>Emprendimiento social</i> , la persecución de metas económicas, sociales y medioambientales a través de emprender un negocio. (p.743)
[66]	Identificar oportunidades y desarrollar una propuesta de valor social para generar inspiración, creatividad, acción directa, coraje y fortaleza retando lo hegemónico y forjando un nuevo equilibrio estable que libere el potencial cautivo o alivie el sufrimiento de un grupo objetivo. Se evidencia que, a través de la creación de un ecosistema estable alrededor del nuevo equilibrio, se asegura tanto un mejor futuro para el grupo objetivo como para la sociedad en general.
[67]	Nosotros definimos <i>emprendimiento social</i> como una innovadora actividad creadora de valor social que puede ocurrir en o entre los sectores no lucrativo, de negocios y gubernamental. (p. 4)
[68]	El uso innovador de la combinación de recursos para perseguir oportunidades encaminadas a la creación de organizaciones y/o prácticas que producen y mantienen beneficios sociales. (p. 5)
[69]	Enfoques innovadores de cambio social. (p. 3) Usar conceptos y herramientas de negocio para resolver problemas sociales. (p. 3)
[70]	Emprendimiento como creación de valor con múltiples dimensiones y ampliado a diferentes tipos de objetivos.
[71]	Enfoques innovadores e ingeniosos que abordan problemas sociales. (p. 1)
[72]	El emprendimiento social engloba las actividades y procesos comprometidos a descubrir, definir y explotar oportunidades para mejorar el bienestar social creando nuevas empresas o administrando organizaciones existentes de una manera innovadora. (p. 522)
[73]	Creación y realización de una empresa orientada a promover un propósito o causa social específica.
[74]	<i>Emprendimiento social</i> puede ser definido en términos generales como el uso del comportamiento emprendedor para fines sociales en vez de objetivos lucrativos, o alternativamente, que las utilidades generadas son usadas para el beneficio de un grupo desfavorecido específico. (p. 288)
[75]	<i>Emprendimiento social</i> puede ser definido como el desarrollo de empresas innovadoras que están basadas en una misión, generan ingreso, crean empleo o concesionan licencias y son creadas por emprendedores sociales individuales, organizaciones sociales u organizaciones no lucrativas asociadas con lucrativas. (p. 25)
[76]	El emprendimiento social es aquella iniciativa fomentada por emprendedores sociales, personas con soluciones innovadoras ante los problemas sociales más demandantes de la sociedad. Son ambiciosos y persistentes, abordando estos problemas y ofreciendo nuevas ideas para el cambio a gran escala.
[77]	El emprendimiento social se refiere a la práctica de combinar la innovación, el ingenio y la oportunidad de abordar los desafíos sociales y ambientales críticos. Los emprendedores sociales se centran en transformar los sistemas y prácticas que son las causas fundamentales de la pobreza, la marginación, el deterioro ambiental y la consiguiente pérdida de la dignidad humana. Al hacerlo, pueden configurarse con fines de lucro o sin fines de lucro, y en ambos casos, su objetivo principal es la creación de cambios sostenibles de los sistemas.
[78]	El emprendimiento social en sentido estricto, aquel, cuyo objetivo es dar solución a un problema social en aquellos sectores de la economía dónde la acción del Estado es ineficaz. El emprendedor social integra un liderazgo social, asumido por personas que asumen retos en comunidades con necesidades sociales manifiestas.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación constituye un aporte al campo del emprendimiento social, en la medida que, bajo un enfoque riguroso, desde la perspectiva metodológica, se desarrolló un análisis del campo de conocimiento y la forma en cómo

se ha estudiado este concepto. A la vez, se favoreció un entendimiento más profundo de dicho concepto, desde una línea de tiempo que facilita la identificación de convergencias y divergencias en las diferentes propuestas de la literatura.

El análisis de tendencias realizado evidenció el creciente interés de investigadores y científicos en el estudio del emprendimiento social como una alternativa para generar valor en doble vía: desde una perspectiva económica y desde una perspectiva social, al responder a demandas urgentes de la sociedad. En relación con el concepto, se encuentra que este requiere alcanzar un mayor grado de madurez en los diferentes sectores donde se implementa. En países como Colombia, requiere continuar su estudio para facilitar que esta alternativa para emprender sea una apuesta a nivel empresarial y que, a su vez, cuente con apoyo de las instituciones gubernamentales y de ecosistemas sólidos que lo favorezcan e impulsen.

En virtud de lo expuesto, se destaca que dentro de la agenda investigativa sobre el tema se requiere continuar clarificando el concepto, la visión y los objetivos que este persigue. Igualmente, se evidenció la necesidad de comprender los factores incidentes en el nacimiento y continuidad de las iniciativas de ES, validando aquellos que limitan o potencializan que estas surjan al interior de los ecosistemas de innovación territoriales y nacionales. Finalmente, dado que en el concepto de ES se enfatiza en su propósito de generación de valor en doble vía, se reconoce como necesario, el desarrollo de modelos de evaluación de impacto donde este enfoque híbrido se aborde, para así permitir evaluar los resultados de dichos modelos de negocio en relación con el objetivo perseguido.

REFERENCIAS

- [1] Kalmanovitz, S. (2019). Nueva historia económica de Colombia. Taurus.
- [2] Méndez, J. (2002). Determinantes de la pobreza en Colombia: Años recientes. United Nations Publications.
- [3] Villa, L. y Melo, J. (2015). Panorama actual de la innovación social en Colombia. BID.
- [4] Arana, S., Ospina, A. y Castro, M. (2019). Value added taxes (VAT) on the food of the family basket in Colombia, project of law 197 of 2018 Impuesto al valor agregado (IVA) a los alimentos de la canasta familiar en Colombia: Proyecto de ley 197 de 2018. Repositorio académico de la universidad de Chile.
- [5] Bargsted, M. (2013). Emprendimiento social desde una perspectiva psicosocial. Omega.
- [6] Escamilla, S. y Alonso, N. (2017). Emprendimiento social. Revista de Estudios de Juventud, 45, 69-81.
- [7] Souza, J. (2007). El emprendimiento social en el cambio de época. Worlds y Knowledges Otherwise.
- [8] Martínez, A., González, D. y Álvarez, N. (2014). Emprendimiento social vs innovación social. Cuadernos aragoneses de economía, 23, 56-67.
- [9] Guzmán, A. y Davila, M. (2008). Emprendimiento social–Revisión de literatura. Estudios gerenciales.
- [10] Eichle, G. y Schwarz, E. (2019). What sustainable development goals do social innovations address? A Systematic Review and Content Analysis of Social Innovation Literature. Sustainability, 522, 80-98.
- [11] Zajko, K. y Bradač, B. (2018). Social Franchising Model as a Scaling Strategy for ICT Reuse: A Case Study of an International Franchise. Sustainability, 3144, 57-68.
- [12] Patiño, J., Ruiz, A. y P. (2018). El emprendimiento en Colombia, una respuesta a los retos de competitividad y desarrollo sostenible. Espacios, 24, 12-22.
- [13] Moya, R. y Cardozo, P. (2010). La motivación para emprender. Evolución del modelo de negocio con impacto social. Omega.
- [14] Sánchez, J. y Botella, J. (2010). Revisiones sistemáticas y meta-análisis. Pearson.
- [15] Tranfield, D. (2009). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. British journal of management, 14(3), 207-222.
- [16] Triantafy, A. (2012). Social entrepreneurship-social enterprises: European experience and the Greek case. Review of European Studies, 58, 245-254.
- [17] Meira, A. y Rojas, Á. (2012). Modelo de ciclo de vida de emprendimientos sociales. RAP.
- [18] Balgiashvili, T. (2017). Comparing Entrepreneurial Passion of Social and Commercial Entrepreneurs in the Czech Republic. Central European Business Review, 16, 23-34.
- [19] Son, H., Lee, J. y Chung, Y. (2017). Value Creation Mechanism of Social Enterprises in Manufacturing Industry: Empirical Evidence from Korea.
- [20] Racolta, N. (2018). Challenges for the development of social entrepreneurship in Romania. Modelling the New Europe.
- [21] Velázquez, N. (2019). Naturaleza de la innovación y modelo de negocios en el emprendimiento innovador. Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía, 50(199), 67-80.
- [22] Shapovalov, V. (2019). Practices of defining the notion of social entrepreneurship. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 9(1), 78-89.
- [23] Živojinović, I. (2019). Social innovation to sustain rural communities: Overcoming institutional challenges in Serbia. CRS.
- [24] Ghosh, S. (2014). Improving complementary feeding in Ghana: Reaching the vulnerable through innovative business-the case of KOKO Plus. McGraw-Hill.
- [25] Andrew, J., Germak, Y. y Karun, K. (2010). Social Entrepreneurship: Changing the Way Social Workers Do Business. Omega.
- [26] Arias, M. (2019). Evaluating the Impact of Social Entrepreneurship: A Multi-criteria Approach. Periodica Polytechnica Social and Management Sciences, 56, 56-67.
- [27] Social Enterprise Knowledge Network. (2000). Alianza de escuelas de negocios de España y América Latina. Alfa.
- [28] Mutis, J. y Ricart, J. (2008). Innovación en modelos de negocio: La Base de la Pirámide como campo de experimentación. Universia Business Review, (18), 10-27.
- [29] Sullivan, G., Weerawardena, J. y Carnegie, K. (2003). Social entrepreneurship: Towards conceptualisation. International journal of nonprofit and voluntary sector marketing, 8 (1), 76-88.

- [30] Laszlo, K. (2009). Leaders of change: Social entrepreneurship and the creation of ecologies of solutions. *ALAR: Action Learning and Action Research Journal*, 15, 345-356.
- [31] Cohen, B., Smith, B. y Mitchell, R. (2008). Toward a sustainable conceptualization of dependent variables in entrepreneurship research. *Business Strategy and the Environment*, 17(2), 107-119.
- [32] Hart, M., Stevenson, H. y Dial, J. (1995). Emprendimiento: una definición revisitada. *Fronteras de la investigación empresarial*, 15(3), 54-63.
- [33] González, A., García, M. y Agudelo, M. (2019). Formando ingenieros emprendedores. *Revista Educación en Ingeniería*, 14(27), 72-82.
- [34] Castro, M., García, M. y Adame, M. (2015). Hacia una comprensión de los conceptos de emprendedores y empresarios. *Suma de negocios*, 13, 98-107.
- [35] Cantillon, R. (1755). *Essai la Nature du Commerce en General*. Macmillan.
- [36] Thornton, M. (1998). Richard Cantillon and the Origin of Economic Theory. *Journal des Economistes et des Etudes Humaines*, 8(1), 61-74.
- [38] Schumpeter, J. (2000). Entrepreneurship as innovation. *Entrepreneurship. The social science view*, 67, 51-75.
- [39] Thompson, J. (2002). The world of the social entrepreneur. *International journal of public sector management*, 15, 412-431.
- [40] De la Garza, M., Berbena, M. y Lemus, J. (2017). Competencias del emprendedor y su impacto en el desempeño organizacional. *Universidad y Empresa*, 19(33), 53-74.
- [41] Parra, J. (2018). Elementos para la valoración integral de proyectos de emprendimiento social. Una herramienta para la formación de emprendedores. *Revista del Departamento Académico de Ciencias Administrativas*, 345, 129-40.
- [42] Manyaka, S. (2015). Social entrepreneurship: A solution for transforming the disadvantaged community of Nellmapius. CRS.
- [43] Dokmanović, M. (2016). Is Social Entrepreneurship Achievable in Macedonia? An Analysis of the Historical Background, Potentials and Perspectives for Concept Development. *Revija za socijalnu politiku*.
- [44] Morales, A., Ariza, A. y Muñiz, N. (2012). El emprendedor social y el E-empowerment de las redes virtuales. *Ciriec*, 34, 153-177.
- [45] Joop, M., Hogenstijn, M. y Meerman, M. (2018). Developing stereotypes to facilitate dialogue between social entrepreneurs and local government. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 567, 340-351.
- [46] Guzmán, A. y Trujillo, M. (2008). Emprendimiento social – Revisión de literatura. *Science*, 789, 105-125.
- [47] Simanavičienė, Ž. Et al. (2015). Comparison of Lithuanian, Italian and British Social Business Models. Pearson.
- [48] Vinogradova, M., Shatsky, A. y Kuljamina, O. (2014). How to Stimulate the Development of the Social Enterprise in Modern Russia. CRS.
- [49] Onno, o. et al. (2019). Responsible innovation by social entrepreneurs: An exploratory study of values integration in innovations. *Journal of Responsible Innovation*, 789, 432-442.
- [50] Parra, C. y Ferran, P. (2017). Emprendeduría social Alternativa sostenible para una nueva economía. *Omega*.
- [51] Dees, J. (1998). *The meaning of social entrepreneurship*. Pearson.
- [52] Cook, B., Dodds, C. y Mitchell, W. (2003). Social entrepreneurship—False premises and dangerous forebodings. *Australian Journal of Social Issues*, 38(1), 57-72.
- [53] Seelos, C. y Mair, J. (2004). *Social entrepreneurship-The contribution of individual entrepreneurs to sustainable development*. McGraw-Hill.
- [54] Mair, J. (2004). *Social entrepreneurship: What are we talking about? A framework for future research*. IESE Business School.
- [55] Tommasini, G. (2004). *The Meaning of Social Entrepreneurship for Congruent Regional Development*. Veneto.
- [56] Roberts, D. y Woods, C. (2005). Changing the world on a shoestring: The concept of social entrepreneurship. *University of Auckland business review*, 7(1), 45-51.
- [57] Leadbeater, C. (2006). *The socially entrepreneurial city. Social entrepreneurship: New models of sustainable social change*. Elsevier.
- [58] Mair, J. y Marti, I. (2006). Social entrepreneurship research: A source of explanation, prediction, and delight. *Journal of world business*, 41(1), 36-44.
- [59] Huybrechts, B. y Nicholls, A. (2012). Social entrepreneurship: Definitions, drivers and challenges. *Social entrepreneurship and social business*, 567, 31-48.
- [60] Peredo, A. y Mclean, M. (2006). Social entrepreneurship: A critical review of the concept. *Journal of world business*, 41(1), 56-65.
- [61] Perrini, F. y Vurro, C. (2006). *Social entrepreneurship: Innovation and social change across theory and practice*. Palgrave.
- [62] Sullivan, G., Weerawardena, J. y Carnegie, K. (2003). Social entrepreneurship: Towards conceptualisation. *International journal of nonprofit and voluntary sector marketing*, 8(1), 76-88.
- [63] Ahra, S. (1993). Environment, corporate entrepreneurship, and financial performance: A taxonomic approach. *Journal of business venturing*, 8(4), 319-340.
- [64] Cochran, P. (2007). The evolution of corporate social responsibility. *Business horizons*, 50(6), 449-454.
- [65] Haugh, H. (2007). Community-led social venture creation. *Entrepreneurship theory and practice*, 31(2), 161-182.
- [66] Martin, R. y Osberg, S. (2007). *Social entrepreneurship: The case for definition*. Elsevier.
- [67] Wei, J. (2007). *Entrepreneurship in the social sector*. Sage.
- [68] Contín, I., Larraza, M. y Mas, I. (2007). Características distintivas de los emprendedores y los empresarios establecidos: evidencia a partir de los datos de REM Navarra. *Revista de empresa*, 20(10), 124-131.
- [69] Brock, D. (2008). *Social entrepreneurship teaching resources handbook*. SSRN.
- [70] Cohen, N. (2015). Entrepreneurial journalism and the precarious state of media work. *South Atlantic Quarterly*, 114(3), 513-533.
- [71] Castillo, A. (1999). Estado del arte en la enseñanza del emprendimiento. *Emprendedores como creadores de riqueza y desarrollo regional*. Alfa.
- [72] Zahra, S. (2009). A typology of social entrepreneurs: Motives, search processes and ethical challenges. *Journal of business venturing*, 24(5), 519-532.
- [73] Murphy, P. y Coombes, S. (2009). A model of social entrepreneurial discovery. *Journal of business ethics*, 87(3), 325-336.

- [74] Hébert, R. y Link, A. (2009). A history of entrepreneurship. Routledge.
- [75] Praszquier, R. y Nowak, A. (2011). Social entrepreneurship: Theory and practice. Cambridge University Press.
- [76] Sen, P. (2007). Shoka's big idea: Transforming the world through social entrepreneurship. *Futures*, 39(5), 534-553.
- [77] Hope, R. (2011). Mobile Water Payment Innovations in Urban Africa. School of Geography and the Environment and Skoll Centre for Social Entrepreneurship at Saïd Business School.
- [78] Acebedo, M. y Velasco, M. (2017). Emprendimiento social femenino: Prolegómenos conceptuales y estudio de casos. *Revista Arbitrada del Centro de Investigación y Estudios Gerenciales*, 27, 102-116.

Desarrollo y aplicación de un instrumento para medir el grado de madurez de los valores *Customer Orientation, Excellence, Responsibility, Teamwork* CERT en las organizaciones

Claudia Yadira Rodríguez Ríos

María Paula Sánchez López

Santiago Cárdenas Jiménez

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

Actualmente, las organizaciones en Colombia, en especial las Mipymes, tienen poco conocimiento acerca del Business Process Management BPM, así como de los beneficios que puede generar en la organización, tales como: reducción del riesgo, de los costos y del tiempo de ciclo del proceso, alinear los negocios del proceso con TI, incrementar la eficiencia operativa, y mantener un mejoramiento continuo. Su implementación está directamente relacionada con un cambio en la cultura y la gestión humana que los realiza. Es tal la importancia de la cultura y del cambio en la misma, en estas implementaciones que diferentes autores se han dedicado a investigar sobre esta nueva cultura, llamándola cultura BPM. En esta cultura se establecen 4 valores, denominados los valores CERT, por sus siglas en inglés, orientación al cliente (*Customer*), excelencia (*Excellence*), responsabilidad (*Responsibility*) y trabajo en equipo (*Team work*), y son estos valores los que determinan el comportamiento y las decisiones que toman los funcionarios en el día a día de sus labores. Es así que Schmiedel, Jan vom Brocke y Jan Recker (2014) desarrollaron un instrumento para medir el grado de madurez de los valores CERT en las organizaciones, el cual permite establecer unas mediciones que reflejan un diagnóstico sobre la madurez de estos en la organización, y pueden influenciar positiva o negativamente la estructura de un grupo de trabajo a nivel empresarial. En este trabajo se aplicó el instrumento mencionado para medir el grado de cultura BPM en una compañía colombiana del sector de servicios, cuyo objeto social es asesorar a las empresas Mipymes a través del acompañamiento en diferentes áreas como: realización de nóminas, contrataciones de personal para fortalecer la estructura organizacional de sus propias firmas. Para lograr el desarrollo de la investigación se realizaron entrevistas al personal por sede de la compañía, en cinco sedes; estos funcionarios son diferenciados como coordinadores o gestores, el primero hace referencia a la persona que lidera los procesos en la oficina que le corresponda y el gestor es quién es el que apoya cada uno de los procesos. Los resultados que arrojó el presente estudio aplicado en la empresa de asesoría y consultoría especializada, indican que hay oportunidades de mejora para las siguientes sub-dimensiones de los valores CERT: en Innovación y mejora continua, que hacen parte del valor excelencia, el reconocimiento a sus empleados por parte de la empresa, que hace parte del valor Responsabilidad, y el trabajo en equipo en la sub-dimensión equipos formales, dado que falta realizar habitualmente reuniones entre las áreas para discutir temas de los procesos, esto se refleja en la poca estandarización de los mismos. De otra parte, los resultados indican que tienen fortalezas especialmente en clientes interno y externo que hacen parte del valor Clientes, en rendición de cuentas y compromiso de los empleados sub-dimensiones del valor Responsabilidad, y en equipos informales donde interactúan con funcionarios de otras áreas que hacen parte de la sub-dimensión del valor de Trabajo en equipo. Lo anterior permite establecer un nivel de 3 en la madurez de su cultura BPM, esto nos permite proponer mejoras con una visión holística de la organización y además se destaca la importancia de implementar estas propuestas, en pro de la eficiencia, eficacia y la mejora continua de los procesos que se llevan a cabo en esta organización.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo de investigación se estudiará la aplicación de los valores CERT enfocados a la cultura BPM propuestos por Schmiedel, et. al, (2014), en una empresa de asesores y consultores radicada en el municipio de Facatativá, con el propósito de evaluar los resultados del estudio y presentar recomendaciones que ayuden a mejorar la eficiencia y la eficacia de la empresa [1]. El BPM es un sistema integrado de gestión basado en procesos compuesto por tres grandes aspectos: los procesos, la tecnología y el Core del negocio, vincula los procesos con los recursos de la organización, las personas, la cultura y los sistemas de información, bajo un esquema de mejora continua que se hace con el monitoreo de la operación y de la gestión de los procesos, lo cuales están alineados con la estrategia empresarial [2].

Por lo anterior, varios e importantes autores se han dado a la tarea de definir la cultura BPM, y determinaron en un importante estudio, cuatro valores denominados los valores CERT, por sus siglas en inglés, orientación al Cliente, Excelencia, Responsabilidad y Trabajo en equipo que permitan establecer el nivel de madurez de la cultura BPM en una empresa [3]. Los cuatro valores tienen cada uno dos sub-dimensiones así: en orientación al Cliente se compone de cliente interno y cliente externo, Excelencia, consta de mejora continua e innovación, Responsabilidad, de compromiso y rendición de cuentas y Trabajo en equipo la constituyen los equipos formales y los informales [3].

En Cliente interno, se analiza los funcionarios de la empresa, que reciben los resultados de los procesos internos, que son realizados por colegas, empleados también, en cómo se le entregan estos resultados, fechas apropiadas oportunas para que ellos a su vez puedan hacer su trabajo, si hay devoluciones por calidad, o no, si la información llega en el formato correcto o no, si son necesarios reprocesos o no. Muy similar al cumplimiento que se requiere ante los clientes externos. Se analiza que pasa con los errores o fallas que el cliente externo manifiesta, si estas situaciones se tienen en cuenta para mejorar los procesos, o si simplemente nadie les hace seguimiento [4].

En la Excelencia, se analiza la innovación y la mejora continua, en las pymes colombianas no es muy común o familiar por decir de alguna manera la innovación, ya que está implica que las mejoras se lleven hasta la comercialización, lo que se encuentra normalmente en el mejor de los casos es que se promueven las mejoras continuas, pero esto tampoco

es común, ya que el día a día es el que marca la operación normal de las pymes, y el estar tratando de solucionar las urgencias y los problemas que se presenten, esto deja poco tiempo a la reflexión y al poder pensar en mejorar.

La Responsabilidad, implica la rendición de cuentas y el compromiso, lo que se denota normalmente en la cultura organizacional de las empresas es que las personas no están acostumbradas a admitir los errores, y se castiga muy duramente los errores que se cometen, lo que forma un círculo vicioso, de no reportar errores, porque está mal, no se comprende que a través de los errores es que se aprende, o que nos sirven para mejorar. En cuanto al compromiso lo que se encuentra es que hay normalmente un alto compromiso de los empleados hacia las organizaciones, y un sentido de pertenencia normal, se podría decir, también se observa que depende de la edad de los funcionarios que trabajan.

En el Trabajo en equipo, se analizan equipos formales e informales, en esto en las pymes colombianas hay oportunidades de mejora, puesto que falta la comunicación asertiva, efectiva y el trabajo de líderes y coequiperos, más que jefes o gerentes, de la misma forma, es importante trabajar en el reconocimiento de las personas, en crear sistemas para generar reuniones efectivas, tipo SCRUM, donde se sientan cómodos de hablar de participar, donde puedan manifestar sus dificultades sin temor y se trabaje sinceramente en solucionar las dificultades, no en aplicar castigos a los que cometan errores, también es conveniente crear espacios amigables adicionales a los formales de trabajo, donde los empleados puedan compartir aspectos más allá de los laborales, esto redundara en una mayor cohesión de los equipos informales, todos estos aspectos están aún incipientes en las empresas colombianas.

Para la presente investigación se utilizó el instrumento del artículo en mención, que fue probado en 222 empresas, de África, América, Asia, Australia y Europa, se tradujo las preguntas al español y se adaptaron a la cultura organizacional de la empresa, de tal forma que fueran claras las preguntas para los participantes, que fueron el 100% de los funcionarios de las cinco sedes. Se utilizó la escala de Likert para la valoración de las respuestas [1]. Luego de aplicar las encuestas, se analizó la información, y se elaboró un informe para la gerencia con las recomendaciones pertinentes, según el diagnóstico encontrado para la cultura BPM de esta organización.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Business Process Management BPM

El BPM es un sistema integrado de gestión basado en procesos compuesto por tres aspectos principales: los procesos, la tecnología y el Core del negocio, vincula los procesos con los recursos de la organización, las personas, la cultura y los sistemas de información, bajo un esquema de mejora continua que se hace con el monitoreo de la operación y de la gestión de los procesos, lo cuales están alineados con la estrategia empresarial [2]. Las practicas del BPM logran identificar situaciones internas, como la cultura organizacional y los valores que se ligan de estos que pueden ser modificadas positivamente para generar una ventaja competitiva respecto a otras organizaciones. Uno de los principales objetivos de BPM es mejorar los procesos de la organización, así como vigilar y controlar la ejecución, de la manera más eficiente y eficaz, para asegurar la correcta satisfacción del cliente [5].

Según Dumas et al., (2013), BPM es una disciplina que recoge los enfoques que le preceden históricamente como son: la calidad total, ISO 9000, la reingeniería de procesos, Lean manufacturing, Balance Score Card, Supply Chain Management, Business Process Outsourcing, Lean Sigma entre otros [6]. Según estos mismos autores, la implementación del BPM, en una organización implica las fases de identificación de los procesos, descubrimiento del proceso, análisis, rediseño, implementación o automatización, del proceso, monitoreo y control, donde se crea un ciclo con la realimentación de la información del monitoreo para hacer un mejoramiento continuo del proceso [6]. Para la presente investigación se usó la fase de rediseño para plantear las recomendaciones a la empresa, de acuerdo con los resultados de la encuesta realizada.

Ahora bien, uno de los aspectos importantes en la implementación de estas tecnologías es la parte humana, es por eso que es tan importante poder tener un diagnostico a nivel organizacional de cómo se encuentra la cultura BPM antes de iniciar cualquier iniciativa BPM. Es por eso que esta investigación toma relevancia en ir aprendiendo a utilizar estos instrumentos en empresas colombianas e ir cambiando poco a poco el enfoque de la organización hacia un enfoque de procesos [2]. Dado lo anterior se analizará a continuación los conceptos de cultura organizacional y de cultura BPM.

2.2 Cultura organizacional

La cultura organizacional se define como el conjunto de valores, tradiciones, interacciones, costumbres, prácticas que guían el actuar de los funcionarios en la organización en el día a día. Es un modelo mental compartido, donde los empleados se comportan de la misma forma ante los estímulos de los eventos a los que se ven expuestos, esto demarca sus relaciones sociales, incluso con agentes externos, esta cultura se mantiene a través del tiempo y puede ir cambiando dependiendo de las condiciones internas y externas [4, 7]. El concepto de la cultura organizacional es versátil, pues es un conjunto de conocimiento adquirido empíricamente o por medio de lecturas, de estudios y hasta puede nacer de la interacción de una o más personas que se relacionan de formas diferentes, es importante el contexto en el que se encuentre; puede ser percibida por medio de sus simbología, de los productos que ofrece, por medio de

los comportamientos sociales e individuales del capital humano existente, por ejemplo: su forma de vestir, sus prácticas y la comunicación de las ideas [8, 9].

Es importante describir de manera general algunos aspectos que influyen en la cultura organizacional, como son: los valores que son un conjunto de normas establecidas en nuestra mente, este conjunto de valores son la guía que nos ayuda a actuar de manera responsable frente a diversas situaciones. Las creencias que son la certeza que un individuo tiene acerca de una determinada cuestión, el trabajo en equipo, que se realiza por varios individuos con un objetivo común, la toma de decisiones, como proceso que al final concluye con una acción básica de escoger entre las alternativas planteadas y la comunicación efectiva, donde se asegura la comprensión del mensaje mediante la retroalimentación [7, 10].

De otra parte, también hacen parte de la cultura organizacional, las creencias, los valores y el código de valores, los lenguajes existentes, los códigos verbales y no verbales, el estilo de liderazgo, los reglamentos, las políticas, las normas, los procedimientos, herramientas de comunicación, la participación en la toma de decisiones, el trabajo en equipo, formales e informales, los incentivos que identifican y cohesionan a los grupos de personas, las características de los miembros de la empresa, lo anterior y más son una representación de un conjunto cultural que brinda una importancia al desarrollo personal, profesional y social de un individuo y que inclusive puede ser reflejado en el desempeño laboral que ejerce [7, 11].

2.3 Cultura BPM

Algunos autores han venido trabajando en la definición de una Cultura BPM, haciendo investigaciones desde un punto de vista holístico, donde se integra la cultura y los valores que influyen en el logro de los objetivos de la firma, el resultado de estos trabajos son lo que se denomina los valores CERT los cuales son: la orientación al cliente, la excelencia, la responsabilidad y el trabajo en equipo [5], como se aprecia en la Tabla 1, adicionalmente cada valor tiene dos sub-dimensiones. La orientación al cliente es identificar y recolectar información importante respecto al cliente se puede hacer de cualquier empresa, en una organización competitiva es el resultado del proceso de planeación tomando en cuenta los factores económicos, sociales y políticos de la empresa y su entorno [12, 13]. Orientación al cliente, se refiere tanto al cliente interno como al externo, es decir, el cliente interno es el que recibe los resultados de los procesos internos o a nivel de la organización, y el cliente externo es el que recibe el producto o servicio, por el cual está dispuesto a pagar a la empresa [1].

Tabla 1. Sub-dimensiones de los valores CERT [6]

Valores CERT	Sub-dimensiones	
Orientación al cliente	Cliente interno	Cliente externo
Excelencia	Innovación	Mejora continua
Responsabilidad	Rendición de cuentas	Compromiso
Trabajo en equipo	Equipos formales	Equipos informales

En cuanto al cliente externo, se trata de establecer en qué grado se centran en la satisfacción y si cumple con las expectativas de los clientes externos, así mismo, si hay quejas por parte de los clientes, saber si se utilizan como retroalimentación para reflexionar acerca de una posible mejora en el proceso, conocer si al momento de diseñar nuevos procesos en la organización se toma en cuenta a los clientes, se tienen identificados los procesos que afectan los clientes externos, estos interrogantes se contestan valorando con la escala del Likert, y cuando se aplica a los funcionarios de la empresa, permiten establecer en qué grado de madurez se encuentra respecto a los clientes externos [1, 4].

De otra parte, para el cliente interno interesa conocer si cada funcionario tiene definido a quien reporta su trabajo en cada proceso, saber si la participación es equitativa con los entregables exigidos ante el cliente externo y la dirección general de la organización, saber si los empleados conocen los actores de los procesos en los que participan, si la alta gerencia los alientan a cumplir con los entregables que requiere la organización, y si ellos tratan a sus compañeros con la misma cordialidad como si fueran sus clientes [1, 4].

El segundo valor de Excelencia, comprende las sub-dimensiones de innovación y mejora continua, como se sabe en innovación no solo es, por ejemplo, sacar productos nuevos, o cambios disruptivos en productos o procesos, sino que esta innovación que se plantea llegue a ser comercializada, entonces no es muy frecuente que en las Pymes colombianas se dé la innovación, pero este tipo de estudios, lo que busca es precisamente dar a conocer estas teorías y estas herramientas a este tipo de empresas, para que empiecen a pensar en innovar, y a reconocer cómo se encuentran frente a los estándares internacionales en este sentido [14-16].

Frente a la innovación, se desea saber si los líderes en la organización permanecen a la vanguardia en busca de ideas, a fin de mejorar los procesos, si la empresa premia a los funcionarios que presentan ideas pioneras para mejorar el rendimiento de los procesos, o si se acoge con satisfacción las innovaciones que aumentan el rendimiento de los

procesos, o si se fomenta un pensamiento fuera de lo común, sin restricciones ni opiniones sesgadas, a fin de crear soluciones innovadoras en los procesos. También se indaga si el líder de sede está abierto a cambios radicales que mejoran el desempeño de los procesos, así como, si la gerencia general está abierta a cambios radicales que mejoran el desempeño de los procesos, estos son los indicadores para saber el nivel de innovación, y estas mismas respuestas o mediciones, indican cuál es el camino a seguir y que prácticas son convenientes para fomentar la innovación en la empresa [1, 4].

En cuanto a, la mejora continua, el instrumento aplicado plantea conocer las percepciones de los funcionarios sobre si la empresa periódicamente revisa sus procesos en busca de mejora, la actitud de cada empleado que participa en el proceso, y si propone mejorarlo continuamente, conocer si la empresa comunica y aplica regularmente casos de éxito con el fin de mejorar sus procesos, si las directivas de las diferentes áreas, regularmente invitan a generar ideas para mejorar los procesos, si los compañeros invitan a generar ideas para mejorar los procesos de la organización regularmente y finalmente, si la empresa utiliza indicadores de rendimiento a fin de mejorar los procesos [1, 4].

El tercer valor CERT es la Responsabilidad, que tiene como sub-dimensiones, la rendición de cuentas y el compromiso, tienen el fin de evaluar la responsabilidad individual que tiene cada integrante de la organización en cuanto al desarrollo de sus objetivos y entregas, y el compromiso, el cual se ve reflejado en su calidad del trabajo, dedicación y perseverancia [1, 4]. La rendición de cuentas, implica el ser responsable de las decisiones que se toman en la empresa, ya que en ocasiones cuando se presentan errores o fallos, los empleados buscan a quien echarle la culpa de los resultados, sin asumir la responsabilidad de sus decisiones, claro que estas situaciones están muy ligadas a satanizar el error y a la poca tolerancia que la cultura organizacional tiene para admitir equivocaciones, poco a poco se debe integrar a la cultura organizacional el reconocer que a partir de los errores y de las crisis hay oportunidades para aprender, cambiar o mejorar [17].

A continuación, se detalla los tópicos que son medidos en el instrumento que se aplicó en la empresa: conocer si los líderes de los procesos de la empresa tienen la autoridad para tomar decisiones en los procesos, si los coordinadores de sede son reconocidos en función del desempeño de los procesos por los que son responsables, si las responsabilidades de los procesos están claramente definidas entre los miembros de las distintas sedes, si los coordinadores de la empresa son responsables de la ejecución de los procesos y si la empresa designa un responsable para cada uno de los procesos [1, 4]

El compromiso, denota el grado de identificación, sentido de pertenencia e integración de un empleado con su empresa, las organizaciones pueden lograr un mejor crecimiento interno y externo, si tienen un alto nivel de compromiso de sus empleados, se puede examinar la influencia en la conducta de las personas que se involucran en los procesos y los efectos que puede tener el compromiso colectivo, continuo y normativo brindando valor agregado en el desempeño del negocio [18, 19].

Ahora bien, para el valor del compromiso, se desea cuantificar: si el funcionario considera que va más allá de sus responsabilidades para lograr los objetivos de los procesos, si la organización valora su dedicación personal, para alcanzar los objetivos de rendimiento de los procesos, si la empresa lo motiva a que sus acciones contribuyan al logro de los objetivos del proceso, si la empresa utiliza los logros actuales, como ejemplo para alentar el compromiso de los empleados a alcanzar los objetivos de los procesos, y si el empleado siente una obligación interna de alcanzar los objetivos de rendimiento de los procesos [1, 4].

El cuarto valor CERT es el Trabajo en equipo, es una estrategia que todas las organizaciones del mundo usan porque se necesita de la ayuda de un grupo pequeño o grande de personas para sacar adelante cualquier tipo de problema, o realizar un proyecto o cumplir un objetivo propuesto; aprovechando al máximo el recurso humano, interdisciplinario, que cuenta con diferentes personalidades, habilidades, conocimientos y experiencias que pueden nutrir y dar valor agregado a cada tarea propuesta en común que se desea realizar; es de suma importancia hacer que las personas se sientan vinculadas al proceso, tomando en cuenta sus opiniones, dando la opción del dialogo y la discusión de alternativas y mejoras que se presente [20].

Otra de las ventajas de poder trabajar en equipo es el éxito en la creatividad y en la forma en la que se afrontan las situaciones; lo cual es importante para la innovación y para mantener una cultura de mejora continua, lo cual se traduce como mejora de la calidad, mayor productividad, adicionalmente, el trabajo en equipo requiere movilización de recursos humanos propios y externos, con aptitudes y habilidades que le permitan adaptarse y en conjunto lograr alcanzar una meta predefinida, además se logra una satisfacción personal, se mejora la motivación laboral, las relaciones humanas, la confianza y el reconocimiento, así como la velocidad de respuesta internamente en las diferentes áreas de trabajo; todo lo anterior afecta positivamente la prestación de los servicios o productos en una organización [21].

En este valor de trabajo en equipo se tienen las sub-dimensiones de equipos formales y equipos informales, para equipos formales, el instrumento indaga la percepción sobre si: en la empresa todas las áreas y sedes que participan

en un proceso se encuentran alineadas, si los coordinadores de la empresa organizan habitualmente reuniones entre las áreas para discutir temas de los procesos, si en la empresa los objetivos generales de un proceso, vinculan a todas las áreas involucradas en el mismo, si el empleado considera que la empresa maneja adecuadamente la coordinación de las tareas y las áreas que están involucradas en un proceso, y si es política de la empresa que los trabajadores compartan su conocimiento de los procesos con otras áreas [1, 4].

En equipos informales se busca saber si: el empleado se siente a gusto trabajando con sus compañeros de otras áreas y/o sedes, si tiene oportunidades para la interacción informal con sus compañeros de otras áreas y/o sedes? (tomar un café, tus hijos, conocer un poco a los compañeros, otros intereses en común), si se identifica con su equipo de proceso en general, incluyendo las otras áreas y sedes, si intercambia informalmente información con colegas sobre temas actuales en sus procesos, y finalmente si la empresa estimula encuentros informales que rompan las barreras entre las áreas y sedes [1, 4].

El estudio se hace desde una perspectiva general para su aplicación en las empresas, sin embargo, la encuesta fue adecuada para el caso específico de la empresa de asesoría y consultoría, para que los funcionarios de esta comprendieran y se identificaran con las preguntas de la encuesta, garantizando así el entendimiento de la misma, y poder obtener respuestas con la suficiente validez y fiabilidad.

3. MÉTODO

Para esta investigación se aplica una encuesta al personal de la empresa de asesoría y consultoría haciendo uso de medios tecnológicos para lograr el objetivo de recolección de datos en esta actividad, cuyo objetivo es establecer una medición de la cultura BPM además de ofrecer un diagnóstico para proponer un plan de mejora y que al implantarse impacte de forma positiva a la organización.

Adicionalmente para desarrollar el presente capítulo se realizó una búsqueda sistemática de información en diversas publicaciones científicas encontradas en las siguientes bases de datos: Science Direct, JSTOR, Emerald, ProQuest y EBSCO. Dichos artículos científicos encontrados, orientaron la investigación con una rigurosa descripción contextual de los temas a tratar a lo largo de este. Se hizo una previa selección de los artículos para identificar, diferenciar y escoger el material pertinente que se acogiese a los requerimientos teóricos de la investigación, de esta forma determinar los conceptos claves que permiten establecer qué aspectos favorecen el estudio de la cultura BPM. Además, para el desarrollo de la investigación y el análisis correspondiente, se obtuvo información clave con base en una entrevista realizada a la gerencia de la empresa.

Durante la realización de la encuesta se hizo un seguimiento por parte de los investigadores con el fin de resolver las dudas que se presentaran por parte de los funcionarios. El seguimiento se dividió en dos talleres virtuales, de los cuales el primer grupo estaban los empleados con el cargo de coordinador y el siguiente grupo con el cargo de gestor. Una vez, realizadas las encuestas, se procedió a analizar y obtener los resultados, recomendaciones y conclusiones para el estudio y la empresa.

4. RESULTADOS

Una vez aplicadas las encuestas al grupo de gestores y coordinadores por medio del uso de herramientas tecnológicas para cada una de las cinco sedes, tal como se acordó con la empresa, se hace la posterior revisión de los datos recolectados. Donde se observa en qué grado se halla la percepción sobre los valores CERT [1]. En la Figura 1 se presentan los resultados generales para cada uno de los valores.

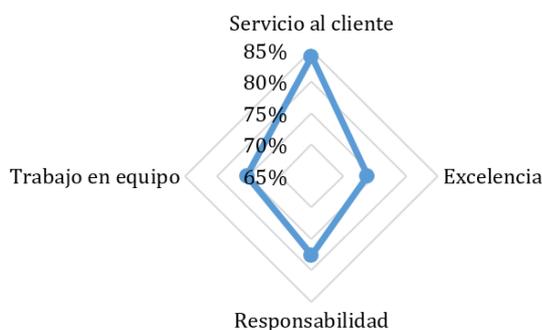


Figura 1. Resultados percepción de los valores CERT

En la Figura 1 se visualiza de forma integral cada componente en el cual registra que la variable que tiene un mayor puntaje en términos de porcentaje es la orientación al cliente con un 85%, lo cual es un indicador de que existe en el

personal de trabajo, una actitud proactiva y receptiva hacia las necesidades que solicita el usuario (interno/externo), también que existe un conocimiento de los productos y servicios de la empresa enfocado a la satisfacción del cliente, del mismo modo, se tuvo los puntajes más altos, en el ítem, donde los casos de quejas por parte de los clientes, se usan como retroalimentación para reflexionar acerca de posibles mejoras en el proceso, igualmente, la empresa identifica los procesos críticos que afectan a los clientes y la empresa periódicamente revisa sus procesos en busca de mejora, además manifiestan que los líderes los alientan a cumplir con los entregables que requiere la organización y conocen a sus colegas y saben exactamente que hacen en cada uno de los procesos, así mismo los tratan con cordialidad, como si fueran clientes externos, con todas estas actitudes asegura una comprensión y un esfuerzo por la satisfacción de los clientes tanto externos como internos. Para ver más claramente el análisis de los otros valores, en la Figura 2 se presentan las sub-dimensiones de cada valor CERT.



Figura 2. Valores CERT con sub-dimensiones

Para el valor de Excelencia que incluye innovación y mejoramiento continuo, dan unos promedios de 72% y 75% respectivamente, sin embargo en innovación, también se encuentran tres aspectos los cuales dieron las puntuaciones más bajas de toda la encuesta los cuales son: la empresa comunica y aplica regularmente casos de éxito con el fin de mejorar sus procesos, la empresa premia a los funcionarios que presentan ideas pioneras para mejorar el rendimiento de los procesos y si la empresa acoge con satisfacción las innovaciones que aumentan el rendimiento de los procesos, como se observa son preguntas que tienen con innovación y específicamente en el reconocimiento que tiene la empresa sobre sus empleados, y la cultura de escuchar y acoger ideas de innovación para los procesos actuales. Esta sería una recomendación importante para la empresa, con el fin de iniciar hacia una cultura de la innovación.

En cuanto a la Responsabilidad, que incluye la rendición de cuentas y el compromiso, sus percepciones dan entre un 79% y 76% correspondientemente, teniendo los valores más altos en rendición de cuentas en cuanto que los líderes de los procesos de la empresa tienen la autoridad para tomar decisiones, los coordinadores de la empresa son responsables de la ejecución de los procesos y en compromiso se destaca que los empleados sienten una obligación interna de alcanzar los objetivos de rendimiento de los procesos. Sin embargo, nuevamente, surge que el reconocimiento de la organización, cuando sale baja la apreciación sobre si valora la dedicación personal, para alcanzar los objetivos de rendimiento de los procesos.

El último valor Trabajo en equipo, donde sus sub-dimensiones son Equipos formales e informales, encontramos una valoración de 69% y un 81% respectivamente, como se observa los equipos formales fueron la sub-dimensión más baja de todas, y el aspecto que fue castigado fue: que los coordinadores de la empresa organizan habitualmente reuniones entre las áreas para discutir temas de los procesos, esto denota una falta de liderazgo, en ocasiones en las organizaciones, cuando el líder no confía en sus subalternos, teme hacer reuniones con ellos, ya que es más sencillo, ir atendiendo las personas una a una y convencerlas de alguna medida, que enfrentar una reunión y que las personas puedan manifestar en público, sus opiniones, ya que pueden no ir en favor de las líneas de las directivas, o puede que dos o más personas se apoyen entre sí, generando una oleada de acuerdos que de pronto no sean favorables para los directivos, o simplemente piensen diferente.

También salió baja: es política de la empresa que los trabajadores compartan su conocimiento de los procesos con otras áreas, nuevamente se observa que falta hacer reuniones con los trabajadores, y ellos lo reciben, esta será una recomendación para la empresa. Porque contrario a esto salió bien calificado: la empresa estimula encuentros informales que rompen las barreras entre las áreas y sedes, y si se siente a gusto trabajando con sus compañeros de otras sedes, lo que indica que, si se reúnen con los funcionarios de otras sedes, pero de manera informal, y no para temas oficiales u organizacionales. Pero estas reuniones informales, se deben mantener, no reemplazar por reuniones formales, sino tal vez aprovechar esa buena relación que se tiene entre los empleados de manera informal, y llevarla que puedan atender y solucionar problemas de cada una de las sedes, por ejemplo.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En cuanto a la cultura BPM en la empresa se evidencia un buen nivel, con porcentajes altos de orientación al cliente y de responsabilidad, sin embargo, es necesario mencionar las acciones de mejora que puede aplicar esta organización en búsqueda de mejorar la eficiencia.

Empezando con los valores más bajos, la excelencia juega un papel importante en la cultura BPM y en la eficiencia de las empresas y frente a su competencia, debido a que el fortalecimiento de este valor ayuda desarrollar la capacidad de adaptación a los cambios, generar oportunidades, tener una mejora de los procesos y aprovechar las fortalezas, por lo cual es recomendable que la firma tome acciones respecto a la innovación y la mejora continua en los productos y procesos, se plantean algunas ideas para lograrlo:

La innovación se puede mejorar generando espacios de creatividad para los funcionarios, dando incentivos a aquellos trabajadores que implementen ideas novedosas, que mejoren los procedimientos de la empresa, que descubran oportunidades de negocio y que mitiguen las fallas de los procesos de la empresa con el fin de aumentar la eficiencia, por otro lado, la mejora continua es un aspecto que se puede mejorar desde el punto de vista de la motivación y la retroalimentación, es decir que los gerentes o directivos deben implementar metas a los trabajadores de tal manera que la realización de estas, tengan una recompensa o un incentivo personal para que los funcionarios se motiven por auto realizarse y cumplir los objetivos corporativos propuestos.

Además, en cuanto a los trabajos que hace cada funcionario, es necesaria una retroalimentación de las entregas con el fin de mejorar la eficacia y la calidad de estas, así mismo se genera una cultura, tanto de soportar observaciones sobre lo que se hace mal, como la cultura de proponer nuevas ideas que mejoren los procesos del día a día, y proponer sin temor a ser juzgados por sus ideas.

Para mejorar el compromiso, se le recomienda a la empresa crear un sistema sencillo de reconocimientos, que permita valorar la dedicación y el esfuerzo de sus empleados para alcanzar los objetivos de rendimiento de los procesos y lograr las metas que se plantean, en ventas, o en conseguir nuevos clientes, por ejemplo.

El trabajo en equipo es otro de los indicadores con un puntaje menor en la empresa, por lo cual es recomendable que se habiliten canales de comunicación entre departamentos o áreas, para que toda la organización esté al tanto del funcionamiento de la empresa, y estén guiados a los objetivos corporativos, las funciones de otros departamentos y las tareas de otros integrantes de la organización, una estrategia que podrían hacer es fomentar reuniones de calidad por ejemplo, donde los empleados puedan manifestar ideas de mejora, sin ningún problema, que no se sientan juzgados por plantear cualquier idea, y donde los empleados de diferentes sedes, puedan compartir sus lecciones aprendidas sobre los procesos críticos de la empresa, o donde puedan contar sus anécdotas sobre problemas particulares, que de pronto se puedan llegar a presentar en las otras sedes.

Además se deben fomentar los equipos de trabajo para el desarrollo de los eventos de convivencia o actividades de integración para mejorar las estructuras informales dentro de la actividad laboral que se basa en las relaciones interpersonales externas al trabajo, aunque este ítem no se encuentra bajo es mejor formalizar que estas reuniones sean bajo la autorización y coordinación de las directivas porque esto genera aprobación por parte de los empleados hacia la gerencia logrando un mayor sentido de pertenencia.

En cuanto a los indicadores que tuvieron un puntaje mayor como lo son la orientación al cliente y la responsabilidad, es importante destacar que, a pesar de tener un buen funcionamiento en estos aspectos, se le recomienda a la empresa implementar medios tecnológicos con el fin de optimizar los procesos y mejorar la experiencia con el cliente. Por el lado de la perspectiva interna es necesario buscar fuentes de motivación de los funcionarios para aumentar la responsabilidad individual y el compromiso.

Resumiendo, en general, entonces en el valor de orientación al Cliente los empleados de la empresa tienen una buena percepción, habría que mejorar un tema de que no sienten que sea equitativo su trabajo frente a las directivas para la ejecución de los procesos críticos, pero esto es algo natural, los que hacen los procesos del core del negocio, son los empleados no las directivas, así mismo se refuerza la idea de mejorar el reconocimiento y promover reuniones para mejorar los procesos.

En cuanto a la Excelencia, que incluye innovación, fue uno de los valores más bajos, y ciertamente, concuerda con la situación de la empresa, es uno de los aspectos más importantes para fortalecer, fortaleciendo una cultura donde se propongan ideas de mejora o innovaciones y que la empresa las apoye, y además les haga el respectivo reconocimiento para motivar a otros que también lo hagan, así como fomentar de manera formal estas reuniones.

Si bien el valor de Responsabilidad no fue valorado tan bajo, si tiene oportunidades de mejora, en cuanto a designar los dueños de proceso en cada sede, así como aclarar las responsabilidades de los funcionarios dentro de los procesos, en el compromiso, se puede mejorar el reconocimiento para que se sientan que se valora los esfuerzos de hacer las cosas bien, y motivar más para que sus acciones contribuyan al logro de los objetivos, así como destacar los pequeños logros que vayan teniendo para afianzar esa conducta en los demás empleados.

Finalmente, para el valor de Trabajo en equipo, se pueden fortalecer la promoción de reuniones cuyo objetivo sea conversar de los procesos, y escuchar y reconocer las mejores prácticas de la organización aprovechando los vínculos

que tienen los equipos de manera informal, y generando la cultura de que los procesos son transversales a la organización y que tocan a más de un área o sede en la empresa, se puede revisar el hacer reuniones tipo SCRUM, donde diariamente por 15 minutos se comparte que paso el día anterior, que estuvo bien, que dificultad hubo y que se requiere para superar los obstáculos, y que se va a realizar en el día de hoy.

6. CONCLUSIONES

La principal contribución de este estudio es la investigación y aplicación de modelos BPM en una empresa, en donde se logra hacer una medición de la cultura BPM, basada en los valores CERT, que nos miden la orientación al cliente, la responsabilidad que incluye la innovación y el trabajo en equipo, que tiene la empresa, para posteriormente identificar dentro de estos, los aspectos críticos o de nivel bajo respecto a los demás, que son oportunidades de mejora para que la organización pueda mejorar y ser más competitiva en su negocio.

Estos valores brindan una perspectiva formal de impacto en la gestión de las organizaciones haciendo uso de buenas prácticas que inciten al cambio continuo, pues este es el punto de partida para futuras investigaciones relacionados con la gestión de los procesos superando los obstáculos que se puedan presentar.

Los autores agradecen a las directivas de la empresa por la disposición al cambio y a la tecnología, que permitieron realizar este estudio, y se espera también poder aportar a ellos las respectivas recomendaciones de mejora, en los puntos que obtuvieron calificaciones bajas, que marcan aspectos claves para la mejora, como son el reconocimiento de los empleados, poder mejorar la motivación para participar en enunciar mejoras y la formalización de reuniones para mejorar los procesos, todas estas acciones redundarán en la creación y fortalecimiento de una cultura de innovación y mejora continua, así como los empleados se puedan sentir cómodos al aportar ideas y reconocidos al aplicar estas ideas en las rutinas de la operación diaria de la empresa, es de destacar que estas mejoras, se pueden implementar rápidamente y que no son tan costosas para la organización.

Los autores están convencidos de que si se mejora el sentido de pertenencia hacia la empresa se evitarán fugas de empleados buenos, o lo que es peor, que estos se retiren de la empresa para instaurar competencia desleal a la organización, con el agravante de quitar los clientes y contactos que se tuvieron, como ha ocurrido en el pasado reciente de la misma.

De igual forma, se concluye que a pesar de que el instrumento elaborado por los autores internacionales [1], es muy completo y valioso, se requiere una adaptación a la cultura y el lenguaje propio de cada organización, para que las preguntas sean claramente comprendidas y tengan la misma interpretación que se desea, y no se presenten malos entendidos, o discrepancias sobre los conceptos que se están evaluando, y así se logró una mayor sinceridad en el momento de dar la valoración en la encuesta que se realiza.

También, se considera importante para el desarrollo profesional de los estudiantes que participan de la investigación, al poder interactuar con los empleados y dar la capacitación en los conceptos de los valores CERT a los funcionarios de la empresa. Estar en capacidad de resolver las dudas de los conceptos, y preparar el instrumento, hacer el análisis de los datos, y preparar las primeras versiones del presente trabajo, ayudará mucho en su madurez y en su comprensión de la realidad organizacional de nuestro país.

Así mismo, se destaca que esta evangelización sobre la cultura de BPM, es importante no solo para la empresa, sino para los estudiantes que participaron del proyecto, por cuanto ya la empresa y los estudiantes tienen en su ADN, el pensar en procesos, el tener claro que las decisiones que se toman tienen consecuencias, como la rendición de cuentas, el pensar que no se trabaja solo, sino que son parte de un equipo que todos deben trabajar para el mismo lado, con un objetivo común, que uno puede tener éxito pero si va en equipo el logro puede llegar a ser grandioso. Pero que para esto necesitamos reconocer y motivar al equipo. Que somos seres interdependientes y que necesitamos del otro para ser mejores, porque somos seres sociales.

Si bien esta es la segunda empresa donde se aplica este instrumento, es claro que se debe continuar por este camino, para poder seguir enseñando y extendiendo esta cultura basada en los procesos, la cultura de BPM. Ya se han realizado estas mediciones en dos empresas de servicios, unos servicios financieros y otros servicios de asesoría y consultoría, sería interesante poder hacerla en una empresa de manufactura, o en una empresa del sector de las flores.

Ahora bien, se resalta que estos son los primeros trabajos que se realizan en Colombia, sobre cultura BPM. Así queda mucho por hacer, en próximas investigaciones que se realicen y se espera que esta cultura poco a poco permee las creencias y valores de las empresas en nuestro país.

REFERENCIAS

- [1] Schmiedel, T., vom Broke, J. y Recker, J. (2014). Development and validation of an instrument to measure organizational cultures support of Business Process Management. *Information and Management*, 51(1), 43-56.

- [2] Rodríguez, C. (2015). Qué es Business Process Management (BPM). Definiciones y conceptos. *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*, 25(98), 23-29.
- [3] vom Broke, J. y Sinnl, T. (2011). Culture in business process management: A literature review. *Business Process Management Journal*, 17(2), 357-378.
- [4] Schmiedel, T., vom Broke, J. y Recker, J. (2013). Which cultural values matter to business process management? Results from a global Delphi study. *Business Process Management Journal*, 19 (2), 292-317.
- [5] Schmiedel, T., Recker, J. y vom Broke, J. (2019). The relation between BPM culture BPM methods, and process performance: Evidence from quantitative field studies. *Information and Management*, 57(2), 103-115.
- [6] Dumas, M. et al. (2013). *Fundamentals of Business Process Management*, First. Springer.
- [7] Melo, L. y Fonseca, E. (2014). Descripción y análisis de la gerencia en Mipymes agroindustriales del departamento de Boyacá, Colombia. *Acta Agronómica*, 63(4), 297-310.
- [8] Jatoba, I. y Alvez, C. (2015). How Organizational Culture influences BPM Evolution. *Association for Information Systems AIS Electronic Library*, 5(1), 733-740.
- [9] Carro, J., Sarmiento, S. y Rosano, G. (2017). La cultura organizacional y su influencia en la sustentabilidad empresarial. La importancia de la cultura en la sustentabilidad empresarial. *Estudios Gerenciales*, 33(145), 352-365.
- [10] Calderón, G., Álvarez, C. y Naranjo, J. (2009). Orientación Estratégica y Recursos Competitivos: Un estudio en grandes empresas industriales de Colombia. *Cuadernos de Administración*, 22(38), 49-72.
- [11] Ulloa, N. (2019). Cultura organizacional ¿Un paradigma social? *Revista ComHumanitas*, 10(2), 150-173.
- [12] Hernández, M., González, A. (2007). Modelo estratégico de mejora continua para la pequeña y mediana empresa mexicana. *Ingeniería Industrial*, 28(3), 6-14.
- [13] Gómez, J. (2019). Diseño de un modelo de evaluación de procesos clave de negocio para la implementación de BPM (Business Process Management) en las MiPymes colombianas. *Pontificia Universidad Javeriana*.
- [14] Malagnino, A. et al. (2019). Business process management and building information modeling for the innovation of cultural heritage restoration process. En *IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage Lecce*. San Diego, USA.
- [15] Jaca, C., Santos, J. (2010). La mejora continua en las organizaciones. *Network de Psicología Organizacional*, 84, 1-5.
- [16] Yáñez, J. y Yáñez, J. (2012). Auditorías, mejora continua y normas ISO: Factores clave para la evaluación de las organizaciones. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 3(9), 83-92.
- [17] Betanzos, N. y Paz, F. (2007). Análisis psicométrico del compromiso organizacional como variable actitudinal. *Anales de psicología*, 23(2), 207-215.
- [18] Urteaga, F. et al (2008). Valores personales y compromiso organizacional. *Enseñanza e Investigación en Psicología*, 13(2), 353-372.
- [19] Ramos, A., Martínez, M. y Maldonado, G. (2009). El impacto del compromiso organizacional en la orientación al mercado. *Investigación y Ciencia*, 44, 48-55.
- [20] Wilkinson, H. y Cardona, P. (2006). El trabajo en equipo. *IESE Business School*, 07(1), 1-10.
- [21] Torrelles, C. et al. (2012). Competencia de trabajo en equipo: Definición y categorización. *Revista de currículum y formación del profesorado*, 15(3), 330-344.

Diseño y validación por el método de elementos finitos del pedestal de la grúa para un buque de apoyo logístico

David Ricardo Alvarado Carvajal
Edison Eduardo Flores Delgado
Omar David Vásquez Berdugo

Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval Marítima y Fluvial
Colombia

El Buque de Apoyo Logístico y Cabotaje (BALC) es una clase de buque que, debido a su bajo calado, es capaz de desarrollar operaciones de ayuda humanitaria en zonas ribereñas y costeras, proporcionar soporte a las operaciones de atención a desastres y dar apoyo logístico a las bases en tierra de la Armada Nacional mediante el transporte de personal, contenedores y carga en general. Para tales fines, el buque hace uso de una grúa ubicada en su costado de babor para hacer carga y descarga de contenedores ubicados en su cubierta. Con el aumento de la demanda de este tipo de embarcaciones, se hizo necesario aumentar la capacidad operativa de la grúa instalada. No obstante, el aumento de esta capacidad implica un rediseño de la estructura que se encuentra bajo cubierta y que está encargada de soportar las cargas asociadas al uso de la grúa. El diseño resultante fue validado mediante un análisis de elementos finitos y se encontró que los resultados son acordes a las recomendaciones en las normas de la sociedad clasificadora. La estructura bajo cubierta está en capacidad de resistir la operación crítica de la grúa cuando se encuentra cargada con 10 toneladas y con una extensión máxima de pluma de 14 metros. En el presente informe se mostrarán los resultados de la validación del diseño por el análisis de elementos finitos: para el análisis estructural, pandeo lineal y análisis de vibraciones.

1. INTRODUCCIÓN

En las operaciones de la Armada Nacional a nivel nacional, existe la necesidad de contar con una embarcación que permita realizar operaciones de transporte de carga y desembarco de personal en zonas de difícil acceso donde el calado para navegación puede ser inferior a 1,55 metros. El Buque de Apoyo Logístico y Cabotaje (BALC), con su capacidad de carga sobre cubierta de 120 toneladas y su bajo calado, permite satisfacer dicha necesidad. Este buque le brinda a la Armada la capacidad de prestar apoyo en operaciones de ayuda humanitaria en zonas ribereñas y costeras, proporcionar soporte en operaciones de atención a desastres y dar apoyo logístico a bases en tierra de difícil acceso.

El buque cuenta con una grúa de 10 toneladas de capacidad y un alcance de 12 metros que permite la carga y descarga sobre cubierta de contenedores y carga en general. No obstante, con el aumento en la demanda de operaciones de este tipo de buque a lo largo de la geografía nacional, es menester el aumento de la capacidad operativa de dicha grúa. De esta manera, fue propuesto el remplazo de la grúa existente por una nueva que permite una carga máxima de 10.000 kg con un brazo de 14 metros. Esta nueva longitud le permitiría aumentar la cobertura del brazo sobre toda la cubierta. Sin embargo, el aumento en dicha capacidad implica un reforzamiento en la estructura bajo cubierta, que es conocida como pedestal, donde la grúa se encuentra apoyada. Dado el nivel de esfuerzos en ciertas regiones de la estructura bajo las nuevas cargas, se optó por un nuevo diseño del pedestal que permita una adecuada distribución de esfuerzos en la estructura del casco, la cual, permanecerá sin cambios.

La estructura de un buque está compuesta por diversos componentes estructurales en un arreglo ortogonal [1]. En general, la estructura del casco está compuesta por una red de vigas longitudinales y transversales ubicadas tanto en el fondo como debajo de la cubierta. Este arreglo da forma al casco y lo provee de la resistencia necesaria a los momentos flectores originados por el movimiento de la superficie del agua y a la ubicación de carga en sus espacios internos y externos [2]. Este conjunto de vigas se conoce como *esloras* si tienen un sentido longitudinal bajo la cubierta; *vagras* si este sentido se da a lo largo del fondo; *baos* si tienen un sentido transversal bajo cubierta; y *varengas* si el sentido transversal se da en el fondo y están acompañados de paneles reforzados, conocidos como mamparos, cuya función radica en soportar cargas coplanares y por ende proveer rigidez a diversos sectores de la embarcación, paneles horizontales distribuidos en varios pisos y que se apoyan sobre la red de vigas, conocidos como cubiertas, y también columnas que transmiten cargas compresivas entre cubiertas, conocidas como puntales [3]. Dicho arreglo debe estar en capacidad de soportar un conjunto de cargas dinámicas dadas por la operación del buque y el ambiente en que este se desplaza a lo largo de su periodo de vida [2]. El orden de dicho arreglo estructural diseñado para soportar diversas cargas no es único, en cambio, puede tener múltiples soluciones [3]. Por ende, el diseño del arreglo estructural que da lugar al pedestal de la grúa también puede tener diversas soluciones que deben ser debidamente justificadas.

El diseño del pedestal debe guiarse por el cumplimiento de normas sugeridas por las sociedades clasificadoras, las cuales, determinan un cierto nivel de esfuerzos sobre la estructura para cada condición de carga. Para el pedestal de la grúa en condiciones de operación con carga máxima y estado de mar 2, el esfuerzo equivalente de Von Mises máximo, según las recomendaciones de la sociedad clasificadora *Lloyd's Register* en su código *Code for Lifting Appliances in a Marine Environment* [4], debe ser menor a 118,5 MPa, un esfuerzo asociado al uso de acero de uso naval A131 grado A. Cuando la grúa se encuentra estibada, el esfuerzo equivalente de Von Mises máximo debe ser

menor a 150 MPa [4]. Adicionalmente, la deflexión máxima permisible en la cubierta debe ser menor a 50 veces la distancia entre rigidizadores de esta [5].

La verificación de dichos esfuerzos y la complejidad geométrica de la estructura del casco hacen necesario el desarrollo de un modelo computacional que haga posible el análisis estructural del pedestal. En primer lugar, se debe tener en cuenta la extensión del modelo por elementos finitos. Un modelo global del buque solo es necesario cuando se necesita estimar la rigidez promedio y la distribución de esfuerzos global en los componentes principales del casco [6, 7]. Por otro lado, un modelo parcial del buque con el nivel necesario de detalle para analizar el nivel de esfuerzos sobre los elementos estructurales secundarios; estos elementos se caracterizan porque su efecto sobre la estructura es netamente local [2]. Usualmente la ubicación de estos elementos de refuerzo secundarios trae consigo concentradores de esfuerzos dadas las discontinuidades geométricas en sus extremos [1]. Un modelo que permita definir con mayor precisión el nivel de esfuerzos en dichas discontinuidades requeriría un gran nivel de detalle y una considerable capacidad de cómputo. De esta forma, los modelos suelen ser usados para calcular esfuerzos nominales y los esfuerzos en las discontinuidades suelen ser estimados mediante tablas de concentración de esfuerzos provistas por las sociedades clasificadoras [6]. Otra posible solución consiste en correr subrutinas del modelo, que permitan generar más detalle de las conexiones entre elementos secundarios con su enmallado correspondiente más denso [6].

En algunas regiones del modelo, el carácter de la solución está dominando por el efecto local de singularidades las se caracterizan por presentar altos nivel de esfuerzos confinados a pequeñas áreas. Estas regiones son conocidas como *hot spots* ya que pueden abarcar menos del 50% de un elemento y poseer elevados gradientes de esfuerzos de tal forma que pueden no corresponde a esfuerzos reales [8]. Estas singularidades geométricas pueden ser producto de condiciones de frontera donde la transición de rigidez es alta, existen problemas de contactos, un error de discretización de la malla, o transiciones agudas en aristas [9]. En la realidad, las transiciones agudas en aristas y en contactos de varios elementos presentan un determinado radio que no es tenido en cuenta por el modelo de elementos finitos [9]. Asimismo, las soldaduras que se aplican en cada unión proveen transiciones menos abruptas en las juntas y no son tenidas en cuenta en el modelo [6, 8].

Diferenciar entre una singularidad geométrica y esfuerzos reales en un concentrador de esfuerzos puede llegar a ser de gran importancia, especialmente, en estudios de fatiga [10]. En métodos computacionales, se sugiere realizar, en primer lugar, un estudio de convergencia de malla con la finalidad de obtener información adicional del gradiente de esfuerzos en la región a tratar y determinar si el tipo de elemento utilizado y su tamaño son los apropiados [9]. La sociedad clasificadora DNV en [6] propone un método de evaluación de esfuerzos en zonas con presencia de concentradores de esfuerzos en los que se toma el valor de los esfuerzos en zonas contiguas a la soldadura para luego realizar una extrapolación de la magnitud de los esfuerzos sobre la arista; y por tanto se discrimina en forma aproximada entre el esfuerzo obtenido por concentradores de esfuerzos y el esfuerzo reportado justo en las aristas.

Por último, se toma en consideración las limitaciones del modelo linear elástico. Dado que las regiones con altos niveles de esfuerzo se encuentran confinadas a pequeñas áreas y teniendo en cuenta la elevada ductilidad del acero naval, se puede asumir una deformación plástica localizada que terminaría por aliviar dichos esfuerzos [11]. La deformación producida permitirá la distribución de la carga en una región más amplia de la estructura de manera que no ocurrirá deformación adicional [12]. La deformación plástica localizada da lugar al fenómeno conocido como endurecimiento por deformación en el cual el material presenta un mayor esfuerzo de fluencia a costa de una considerable pérdida en su ductilidad después del primer ciclo de carga y descarga [13].

En el presente estudio se evalúa el diseño del pedestal para la grúa mediante un análisis, basado en el método de elementos finitos, la distribución de esfuerzos en la estructura y el cumplimiento de normas de la sociedad clasificadora, sus frecuencias de resonancia mediante un análisis modal y la estabilidad estructural a compresión con un análisis de pandeo lineal.

2. MÉTODO

En la presente metodología, se detalla el desarrollo computacional para verificar el cumplimiento de las normas de la sociedad clasificadora por parte del diseño del pedestal [4] y el alcance de dichas normas. Se describe el modelamiento de la estructura, el enmallado realizado, condiciones de frontera y condiciones de carga. Para el desarrollo del presente estudio, fue necesario realizar ciertas suposiciones:

1. *Estado plano de esfuerzos*: Las secciones del ensamble cuyo espesor es considerablemente menor con relación a sus demás dimensiones y que además no presentan cargas perpendiculares, pueden simplificarse como elementos bidimensionales o tipo *Shell*. Dado el caso en que las secciones del ensamble no cumplan con las condiciones previamente descritas, serán modelados como tridimensionales.
2. *Supresión de elementos de soporte terciarios*: los rigidizadores menores y cartabones tienen un efecto limitado en el perfil de esfuerzos. De esta forma, solo se añaden en regiones críticas del modelo y en cercanías a la región de estudio.

3. *Análisis lineal-elástico*: El presente análisis es desarrollado bajo un modelo lineal- elástico del material y deflexiones bajas. Con este modelo, el esfuerzo varía lineal y proporcionalmente respecto a la carga aplicada.
4. *Simplificación de las uniones soldadas*: El estudio del comportamiento de las uniones soldadas bajo las cargas aplicadas se encuentra fuera del alcance de este análisis. Por ende, el ensamble de las piezas se representa como contactos tipo *bonded* con el fin de evitar movimientos relativos entre las mismas. De igual forma, las uniones de paneles que se encuentren en el mismo plano son simplificados al asumir la continuidad del material. Es menester anotar que la aplicación de contactos en la superficie puede generar puntos de esfuerzos altos o *hot spots* los cuales no representan adecuadamente el estado real de los esfuerzos [9].

2.1 Geometría

El diseño estructural del buque definió las dimensiones de la zona donde se instalará la grúa. La cubierta del buque está constituida por planchas de acero de 7,9 mm de espesor y dos insertos de 12,7 mm y 25,4 mm, el costado está constituido por planchas de acero de igual espesor y un inserto de 12.7 mm. El mamparo de FR 33, donde se ubicará la grúa, posee un espesor de 6,35 mm y tiene tres insertos: el primero, cerca del doble fondo; con un espesor de 9,53 mm, un inserto intermedio de 12,7 mm y un inserto cercano a cubierta de 19 mm. El mismo mamparo cuenta con rigidizadores verticales del tipo HP 120 x 8.

La ubicación de la grúa requiere de una zona reforzada, motivo por el cual se ubicará en el mamparo de FR33 y razón por la cual fueron agregados los insertos de casco y cubierta. El arreglo estructural del pedestal consiste en un cilindro en cubierta con un diámetro de 1.300 mm y un espesor de 25,4 mm que es soportado por un mamparo transversal y un cilindro debajo de la cubierta con características similares y sus respectivos refuerzos internos. A su vez, dicho cilindro está soportado por una reducción con una longitud de 600 mm de largo y 19 mm de espesor que termina en un tubo inferior con un diámetro de 750 mm y 19 mm de espesor. Esta última sección se encuentra apoyada en un inserto de 12,7 mm de espesor sobre el doble-fondo.

Se modeló una sección del buque de manera conservadora y que abarca longitudinalmente entre el mamparo de FR 29 y el mamparo de FR 36, de manera transversal; del costado de babor hasta la línea de crujía y en sentido vertical; desde el fondo hasta la cubierta principal. Esta sección fue modelada en el software SpaceClaim. En este arreglo se presentan todos los elementos estructurales como superficies sin espesor Posteriormente, se asigna a cada pieza su espesor real como una constante a ingresar para la solución del análisis, como se observa en la Figura 1.

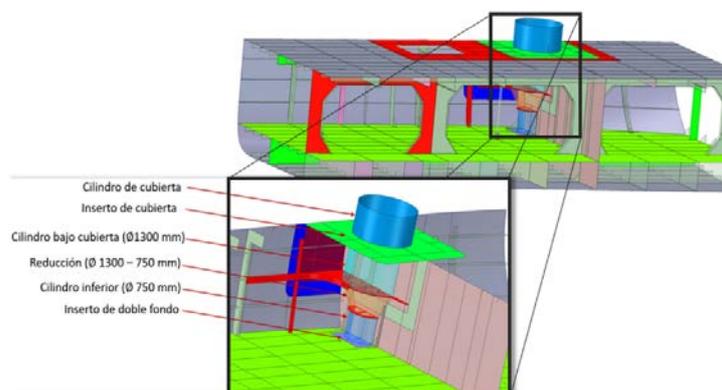


Figura 1. Vista tridimensional de la estructura y detalle del pedestal de la grúa

2.2 Materiales

Para el análisis por elementos finitos, fueron asignadas a la estructura las propiedades mecánicas del acero de uso naval A131 grado A, las cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero naval A131 grado A

Caso de carga	Valor
Módulo de elasticidad	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Esfuerzo de fluencia	235 MPa
Esfuerzo último	460 MPa

2.3 Mallado

El modelo estructural consta de elementos del tipo SHELL181 que representan las superficies de la geometría [Figuras 2 y 3]. Este tipo de elemento permite analizar estructuras de espesores delgados [14]. Las superficies tipo bulbo son modeladas como secciones rectangulares que conservan la longitud y espesor del alma del bulbo, asemejándose de

permisible de este caso es 13% mayor en comparación con el caso 1, se considera a este caso (Tabla 2) como una condición crítica [11].

Tabla 2. Esfuerzos equivalentes permisibles según los casos de carga

Caso de carga	Esfuerzo fluencia (MPa)	Factor de esfuerzos	Esfuerzo equivalente permisible (MPa)
Caso 1: operación sin viento	235	0,5	118
Caso 2: operación con viento	235	0,57	134
Caso 3: grúa estibada	235	0,64	150

2.6 Condiciones de carga

Se tuvo en cuenta diversas condiciones de carga para verificar el cumplimiento sugerido por la casa clasificadora *Lloyd's Register* para el pedestal de la grúa. En el modelo estructural se modelaron las fuerzas que se presentan en la grúa cuando se encuentra estibada y en operación. Para la grúa en operación, se varía el ángulo en que las cargas son aplicadas respecto al centro de rotación de la grúa que a su vez está representada por su cilindro de cubierta. Para todos los casos estudiados se incluyó el efecto de la gravedad sobre los elementos que componen la estructura y los efectos dinámicos generados por el movimiento del barco descrito en función de aceleraciones longitudinales, transversales y verticales según norma [4]. Para el caso 1, el momento de rotación es igual para todos los ángulos de carga y se toma a partir del valor calculado por norma [4, 12]. En el análisis del caso 3 no es necesario incluir el momento de rotación ya que la grúa se encuentra estibada [4].

2.6.1 Cargas en operación sin viento (Caso 1)

Las reglas de clasificación de *Lloyd's Register* [1] definen que para la evaluación de un pedestal de grúa se debe considerar un factor de trabajo *duty factor* de 1,2; valor adecuado para una vida de operación que no excede los 6×10^5 ciclos. Se considera que la grúa operará como máximo en un estado de mar 2. Los ángulos máximos de escorado (inclinación lateral) y trimado (inclinación longitudinal) a los que será operada la grúa serán de 5° y 2° respectivamente [1]. Estos ángulos implican la descomposición de las fuerzas propias de la carga y peso de la grúa en las direcciones vertical, longitudinal y transversal. Al mismo tiempo, se consideran las cargas dinámicas generadas por el izaje de las cargas por medio de un factor multiplicado de izaje que cuenta con un valor de 1,3 según recomendaciones de las normas para este tipo de grúas [4, 12].

Para este tipo de carga se simula el efecto de la carga viva y el peso de la grúa desde su centro de masa cuando la pluma se encuentra a 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° y 315° respecto a proa (Figura 5). Para las condiciones descritas, se considera como situación extrema permitida las cargas en el gancho de la grúa cuando esta tiene una inclinación vertical de 0° ; ya que en esta posición se obtendría el mayor efecto del momento flector sobre la estructura. No obstante, las operaciones que requieran este ángulo de inclinación serían poco comunes. Se consideran aceleraciones por rotación en el gancho de 0.6 m/s^2 en la posición de la carga y de 0.2 m/s^2 en el centro de masa de la grúa [4]. Los componentes de las cargas se calculan según [4] y son resumidos a continuación (Tabla 3).

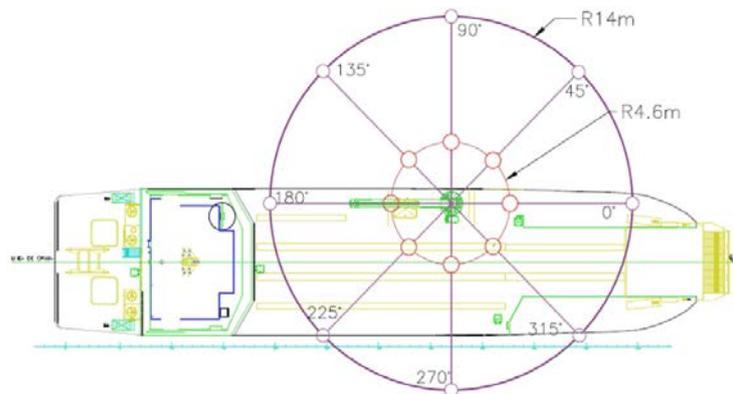


Figura 5. Ubicación de las diversas fuerzas a considerar en el gancho y centro de gravedad de la grúa para caso 1

Tabla 3. Descripción de cargas aplicadas al modelo en el caso 1

Caso de carga	Cargas operacionales (kN)	Ubicación (desde origen de coordenadas)
Componente vertical de carga viva	153,0 kN	Remota a 14 m del centro del cilindro de cubierta
Componente vertical de carga muerta	211,8 kN	Remota a 4.6 m del centro del cilindro de cubierta
Componente transversal de carga viva	13,3 kN	Remota a 14 m del centro del cilindro de cubierta
Componente transversal de carga muerta	18,5 kN	Remota a 4.6 m del centro del cilindro de cubierta
Componente longitudinal de carga viva	5,3 kN	Remota a 14 m del centro del cilindro de cubierta
Componente longitudinal carga muerta	7,4 kN	Remota a 4.6 m del centro del cilindro de cubierta
Momento por rotación	120 kN.m	Desde el centro del cilindro de cubierta

2.6.2 Cargas cuando la grúa estibada (Caso 3)

El caso 3 examina la situación en que la grúa se encuentra plegada, en posición de reposo sin carga alguna en el gancho. Además, se considera condiciones exteriores que pueden inducir esfuerzos a considerar. Se utiliza un ángulo de trimado y escorado de 30° [4], velocidad de viento de 63 m/s, una aceleración normal de 1 g, y una aceleración lateral y longitudinal de 0.5 g [4] (Figura 6). Las cargas evaluadas en este caso se encuentran resumidas en la siguiente tabla (Tabla 4).

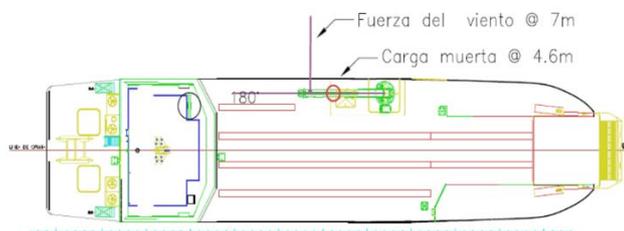


Figura 6. Ubicación de las diversas fuerzas a considerar en el gancho y centro de gravedad de la grúa para caso 3

Tabla 4. Descripción de cargas aplicadas al modelo en el caso 3

Caso de carga	Cargas operacionales (kN)	Ubicación (desde origen de coordenadas)
Componente vertical de carga muerta	176,5 kN	Remota a 4.6 m del centro del cilindro de cubierta
Componente transversal de carga muerta	176,5 kN	Remota a 4.6 m del centro del cilindro de cubierta
Componente longitudinal de carga muerta	176,5 kN	Remota a 4.6 m del centro del cilindro de cubierta
Carga del viento (@63 m/s)	67,0 kN	Remota a 7 m del centro del cilindro como centro de presión

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la presente sección se mostrará y discutirá los resultados obtenidos para los casos de carga previamente descritos. Tal como se afirmó anteriormente, las transiciones súbitas de rigidez pueden elevar los esfuerzos reportados en los nodos en las aristas de forma que pueden no corresponder con la realidad. Asimismo, en algunas regiones, el carácter de la solución está dominado por el efecto local de singularidades. En ciertas regiones puede darse deformación plástica localizada durante el primer ciclo de carga. Esta deformación permitiría una distribución de la carga en una región mayor. Adicionalmente, esta deformación plástica localizada da lugar al fenómeno conocido como endurecimiento por deformación. Con este, las regiones afectadas elevarían su esfuerzo de fluencia permisible a costa de una pérdida en su tenacidad.

3.1 Análisis modal

En el análisis modal (o vibración libre) se evaluó las frecuencias en la que las vibraciones pueden ocasionar fenómeno de resonancia en los diversos componentes de la estructura. Se evaluó 10 diferentes frecuencias de resonancia manteniendo las condiciones de frontera descritas en la Tabla 5. El valor mínimo de resonancia reportado tiene un valor de 15,98 Hz y es ubicada en un refuerzo del forro de la embarcación entre FR 29 y 32. Las demás frecuencias reportadas se ubican en otras zonas del costado, cubierta y refuerzos secundarios. La selección de los equipos del buque debe hacerse teniendo en cuenta las frecuencias de resonancia descritas a continuación. Se debe hacer una consideración especial al momento de seleccionar equipos de tal forma que su frecuencia de operación sea menor a 15,9 Hz, que no coincida con las demás frecuencias de resonancia reportadas para la estructura o que los equipos cuenten con los elementos de amortiguación necesarios.

Tabla 5. Frecuencias de resonancia obtenidas por análisis modal

Modo	Frecuencia [Hz]
1	15,98
2	16,13
3	16,35
4	25,65
5	34,38
6	35,48
7	35,73
8	36,97
9	37,02
10	37,52

3.2 Análisis de pandeo lineal

Se realizó un análisis de pandeo lineal (eigenvalue Buckling) aplicando una carga unitaria sobre el cilindro en la cubierta; con el fin de obtener un factor multiplicador lineal contra pandeo. Se considera que la estructura no fallará

por pandeo dado que el factor multiplicador obtenido tiene un valor de $2,79 \times 10^6$; este valor multiplicado por la carga unitaria da como resultado una carga crítica para pandeo muy superior a la fuerza compresiva sobre la estructura de la carga vida y muerta por lo que se descartaría el pandeo como modo de falla de la estructura.

3.3 Análisis estructural

En el presente numeral se discutirán los resultados obtenidos para las condiciones de carga 1 y 3 para las distintas posiciones angulares de la grúa en función de deflexión y esfuerzo máximos permisibles.

3.3.1 Condición de grúa en operación a 45°

A continuación, se presenta la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises en la estructura según las cargas y ubicaciones previamente discutidas. La deflexión máxima, el esfuerzo equivalente y el factor de seguridad respecto al máximo esfuerzo permisible se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. Descripción de deflexiones y esfuerzos para la pluma ubicada a 45° de proa

Deflexión máxima (mm)	Esfuerzo equivalente máximo (MPa)	Esfuerzo máximo permisible (MPa)	Factor de seguridad
2,64	78,6	118,5	1,5

La deflexión máxima ocurre en el cilindro de cubierta (Figura 7). La deflexión máxima en la cubierta es de 1,92 mm, esta deflexión no afecta el correcto funcionamiento de la grúa. Por otro lado, el esfuerzo máximo reportado por el programa se ubica en un *hot spot*. De esta forma, el esfuerzo nominal máximo en la estructura para este tipo de carga es de 78,6 MPa. En general, los valores de esfuerzo en el pedestal son inferiores a 60 MPa. En la Figura 8 se muestran las regiones cuyos esfuerzos están por encima de 120 MPa.

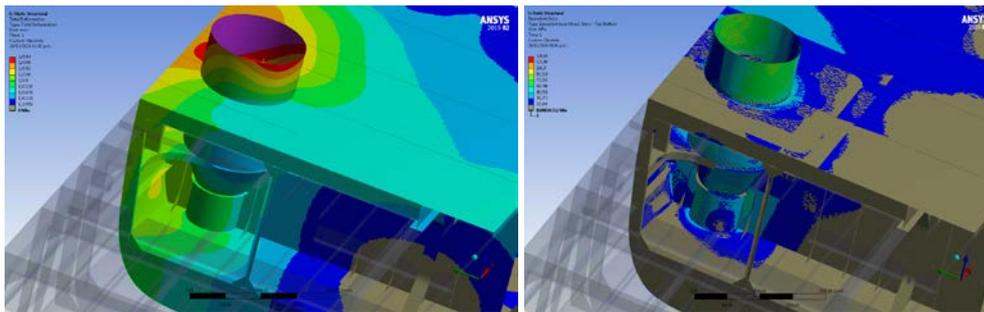


Figura 7. Deflexiones en el modelo (izquierda) y niveles de esfuerzo (derecha)

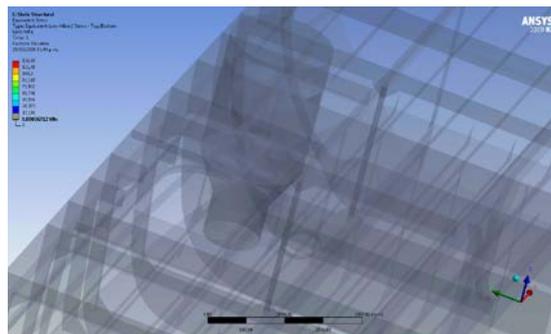


Figura 8. Niveles de esfuerzo superiores a 120 MPa

3.3.2 Condición de grúa en operación a 90°

Se presenta la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises en la estructura según las cargas y ubicaciones previamente discutidas. La deflexión máxima, el esfuerzo equivalente y el factor de seguridad respecto al máximo esfuerzo permisible se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Descripción de deflexiones y esfuerzos para la pluma ubicada a 90° de proa

Deflexión máxima (mm)	Esfuerzo equivalente máximo (MPa)	Esfuerzo máximo permisible (MPa)	Factor de seguridad
2,61	105,4	118,5	1,12

La deflexión máxima ocurre en el cilindro de cubierta ensamble, la deflexión máxima en la cubierta es de 2,36 mm. Esta deflexión no afecta el correcto funcionamiento de la grúa (Figura 9).

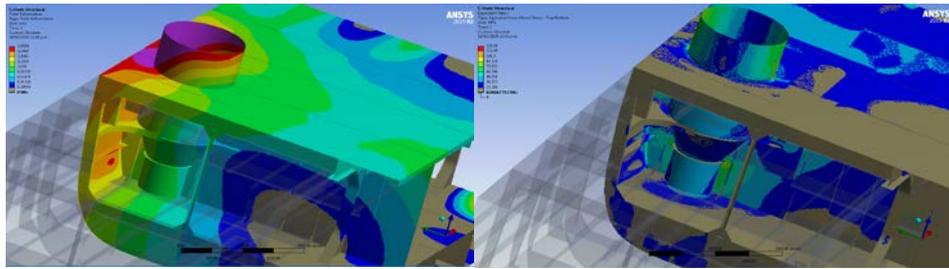


Figura 9. Deflexiones en el modelo (izquierda) y niveles de esfuerzo (derecha)

El esfuerzo máximo reportado se ubica en un *hot spot*. De esta forma, el esfuerzo nominal máximo en la estructura para este tipo de carga es de 105,45 MPa en el cilindro superior. En general, los valores de esfuerzo en el pedestal son inferiores a 85 MPa (Figura 9 derecha y Figura 10 izquierda). No obstante, Este caso de carga se diferencia de los demás dado que en la región de ensamble entre la cubierta y el cilindro hay una región muy focalizada que muestra un esfuerzo ligeramente mayor al esfuerzo máximo permisible (Figura 10 derecha). La región en que se dan estos esfuerzos se caracteriza por la intersección de tres elementos con una penetración del rigidizador en el cilindro debido a la constitución misma del modelo. Por lo tanto, existen contactos puntuales entre varias superficies y aristas que, según se discutió previamente, sus valores de esfuerzo pueden no representar la realidad. Por otro lado, al darse que la zona afectada es focalizada y cuyo valor no supera los 165 MPa (70% del esfuerzo de fluencia real del material), se considera que no compromete la integridad estructural del cilindro y puede tomarse como un caso de endurecimiento por deformación. En estos casos, el metal dúctil se vuelve más resistente y duro a medida que es deformado plásticamente [12, 13].

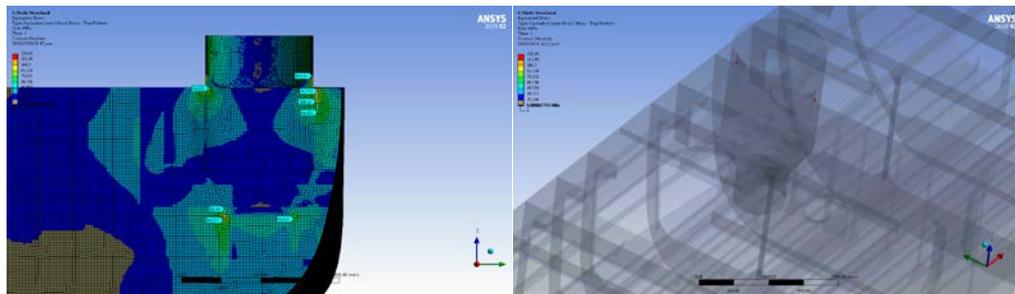


Figura 10. Corte lateral del modelo: nivel de esfuerzos(izquierda) y esfuerzos superiores a 120 MPa (derecha)

3.3.3 Condición de grúa en operación a 135°

A continuación, se presenta la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises en la estructura según las cargas y ubicaciones previamente discutidas. La deflexión máxima, el esfuerzo equivalente y el factor de seguridad respecto al máximo esfuerzo permisible se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8. Descripción de deflexiones y esfuerzos para la pluma ubicada a 135° de proa

Deflexión máxima (mm)	Esfuerzo equivalente máximo (MPa)	Esfuerzo máximo permisible (MPa)	Factor de seguridad
2,27	95,3	118,5	1,24

La deflexión máxima ocurre en el cilindro. Asimismo, la deflexión máxima en la cubierta es de 1,73 mm. Esta deflexión no afectaría el correcto funcionamiento de la grúa. El esfuerzo nominal máximo en la estructura para este tipo de carga es de 95,3 MPa ubicado en el cilindro de cubierta. En general, los valores de esfuerzo en el pedestal son inferiores a 65 MPa (Figura 11 izquierda). No obstante, se evidencia regiones en donde existen contactos puntuales entre varias superficies y aristas que, según se discutió previamente, sus valores de esfuerzo no representan la realidad. En la Figura 11 derecha se muestran las regiones cuyos esfuerzos están por encima de 120 MPa.

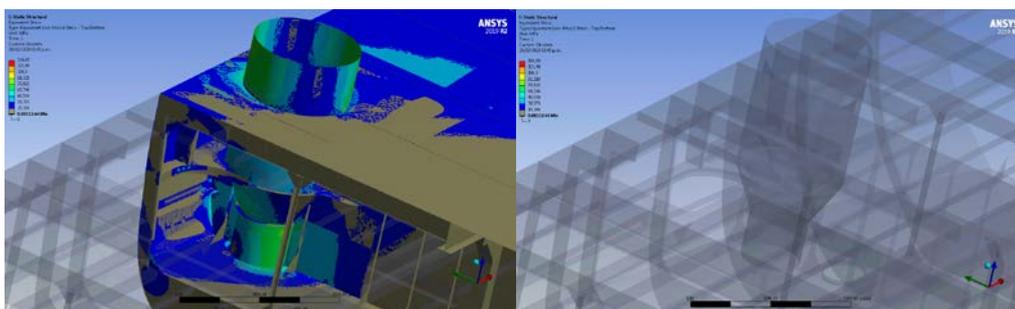


Figura 11. Nivel de esfuerzos (izquierda) y esfuerzos superiores a 120 MPa (derecha)

3.3.4 Condición de grúa en operación a 180°

En seguida, se presenta la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises en la estructura según las cargas y ubicaciones previamente discutidas. La deflexión máxima, el esfuerzo equivalente y el factor de seguridad respecto al máximo esfuerzo permisible se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Descripción de deflexiones y esfuerzos para la pluma ubicada a 180° de proa

Deflexión máxima (mm)	Esfuerzo equivalente máximo (MPa)	Esfuerzo máximo permisible (MPa)	Factor de seguridad
2,21	99,04	118,5	1,19

La deflexión máxima ocurre en el cilindro de cubierta. Por otro lado, la deflexión máxima sobre la cubierta es de 1,62 mm; esta deflexión no afectaría el correcto funcionamiento de la grúa (Figura 12 izquierda). El esfuerzo nominal máximo en la estructura para este tipo de carga es de 99,04 MPa y se encuentra ubicado en el cilindro inferior.

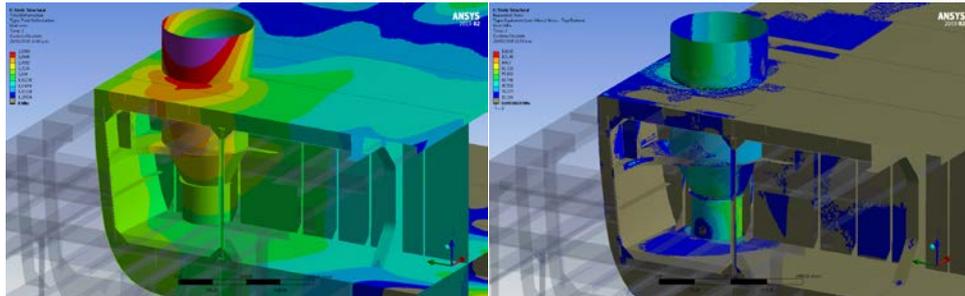


Figura 12. Deflexiones en el modelo (izquierda) y niveles de esfuerzo (derecha)

En general, los valores de esfuerzo en el pedestal son inferiores a 60 MPa (Figura 12 derecha y 13 izquierda). No obstante, se evidencia regiones en donde existen contactos puntuales entre varias superficies y aristas que, según se discutió previamente, sus valores de esfuerzo no representan la realidad. En la Figura 13 (derecha) se muestra las regiones cuyos esfuerzos están por encima de 120 MPa.

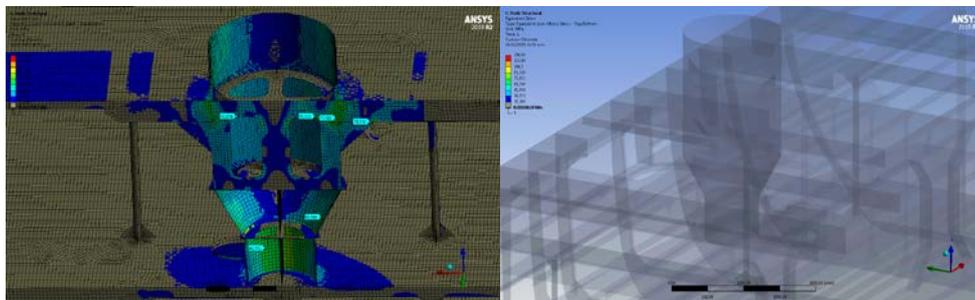


Figura 13. Corte longitudinal con ilustraciones del nivel de esfuerzos (Izquierda) y esfuerzos superiores a 120 MPa (derecha)

3.3.5 Condición de grúa en operación a 225°

La deflexión máxima, el esfuerzo equivalente de Von Mises y el factor de seguridad respecto al máximo esfuerzo permisible se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Descripción de deflexiones y esfuerzos para la pluma ubicada a 225° de proa

Deflexión máxima (mm)	Esfuerzo equivalente máximo (MPa)	Esfuerzo máximo permisible (MPa)	Factor de seguridad
2,71	109,2	118,5	1,08

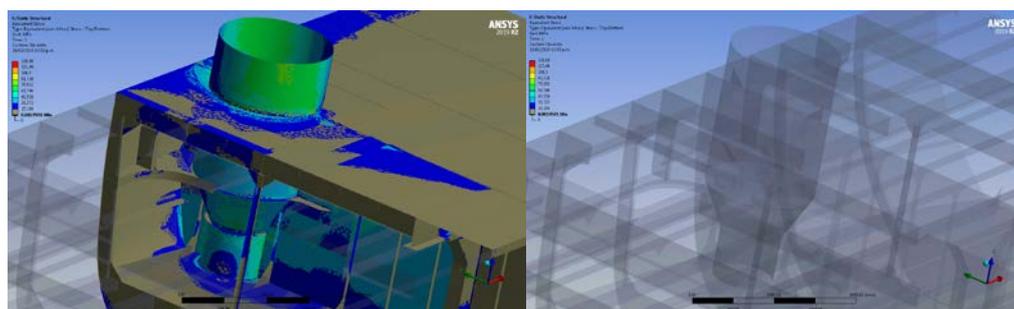


Figura 14. Nivel de esfuerzos (izquierda) y esfuerzos superiores a 120 MPa (derecha)

La deflexión máxima ocurre en el cilindro de cubierta. La deflexión máxima sobre la cubierta es de 1,79 mm; esta deflexión no afectaría el correcto funcionamiento de la grúa. El esfuerzo nominal máximo en la estructura para este tipo de carga es de 99,04 MPa ubicado en el cilindro superior. En general, los valores de esfuerzo en el pedestal son inferiores a 78 MPa (Figura 14 izquierda). En la Figura 14 derecha se muestra que no hay evidencia de regiones cuyos esfuerzos están por encima de 120 MPa.

3.3.6 Condición de grúa en operación a 270°

La deflexión máxima, el esfuerzo equivalente y el factor de seguridad respecto al máximo esfuerzo permisible son resumidos en la Tabla 11. La deflexión máxima tiene lugar en el cilindro de cubierta. Por otro lado, la deflexión máxima en la cubierta es de 1,68 mm. Esta deflexión no afectaría el correcto funcionamiento de la grúa.

Tabla 11. Descripción de deflexiones y esfuerzos para la pluma ubicada a 270° de proa

Deflexión máxima (mm)	Esfuerzo equivalente máximo (MPa)	Esfuerzo máximo permisible (MPa)	Factor de seguridad
2,35	99,04	118,5	1,19

El esfuerzo nominal máximo en la estructura para este tipo de carga es de 99.04 MPa ubicado en el cilindro superior. En general, los valores de esfuerzo en el pedestal son inferiores a 78 MPa [ver figura 15a]. No obstante, se evidencia en el cilindro de cubierta regiones en donde existen contactos puntuales entre varias superficies y aristas que, según se discutió previamente, sus valores de esfuerzo no representan la realidad. Adicionalmente, se muestra un aumento de esfuerzos en el mamparo y una consecuente disminución del nivel de esfuerzos en la estructura del pedestal bajo cubierta y por ende un aumento en el factor de seguridad en la estructura. En la figura 15b se muestran las regiones cuyos esfuerzos están por encima de 120 MPa.

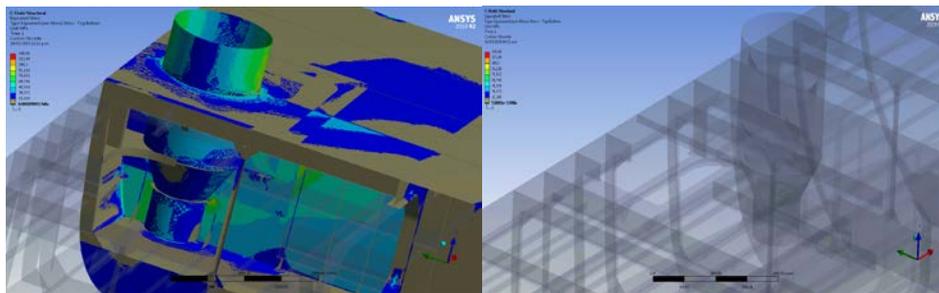


Figura 15. Nivel de esfuerzos (izquierda) y esfuerzos superiores a 120 MPa (derecha)

3.3.7 Condición de grúa en operación a 315°

La deflexión máxima, el esfuerzo equivalente y el factor de seguridad respecto al máximo esfuerzo permisible son resumidos en la Tabla 12. La deflexión máxima tiene lugar en el cilindro de cubierta. La deflexión máxima en la cubierta es de 1,73 mm y esta no afectaría el correcto funcionamiento de la grúa.

Tabla 12. Descripción de deflexiones y esfuerzos para la pluma ubicada a 315° de proa

Deflexión máxima (mm)	Esfuerzo equivalente máximo (MPa)	Esfuerzo máximo permisible (MPa)	Factor de seguridad
2,27	95,3	118,5	1,24

El esfuerzo nominal máximo en la estructura para este tipo de carga es de 95,3 MPa ubicado en el cilindro de cubierta. En general, los valores de esfuerzo en el pedestal son inferiores a 65 MPa (Figura 16 izquierda). No obstante, se evidencia que en el cilindro de cubierta existen contactos puntuales entre varias superficies y aristas que, según se discutió previamente, sus valores de esfuerzo no representan la realidad. En forma similar al caso anterior de carga, pero con una magnitud inferior, el mamparo muestra elevados niveles de esfuerzos. En la Figura 16 derecha se muestran las regiones cuyos esfuerzos están por encima de 120 MPa.

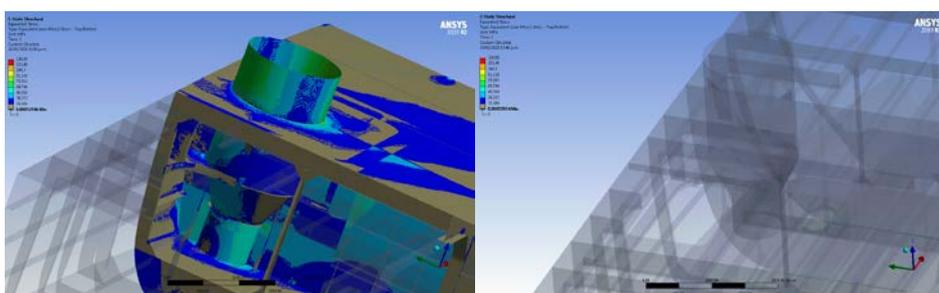


Figura 16. Nivel de esfuerzos (izquierda) y esfuerzos superiores a 120 MPa (derecha)

3.3.8 Condición de carga 3: Grúa estibada a 180°

En la condición de carga 3, la grúa se encuentra estibada y sin carga viva. Por ende, solo se cuenta en el análisis estructural los efectos del peso de la grúa ubicada en su centro de gravedad y la fuerza de viento a una velocidad de 63 m/s que tiene a la pluma como centro de presión. Esta velocidad de vientos es característica de condiciones de mar 3. La deflexión máxima, el esfuerzo equivalente de Von Mises y el factor de seguridad respecto al máximo esfuerzo permisible son resumidos en la Tabla 13.

Tabla 13. Descripción de deflexiones y esfuerzos para la grúa estibada

Deflexión máxima (mm)	Esfuerzo equivalente máximo (MPa)	Esfuerzo máximo permisible (MPa)	Factor de seguridad
1,34	44,3	150	3,38

La deflexión máxima del modelo ocurre en el cilindro de cubierta con un valor de 1,34 mm. Adicionalmente, la deflexión máxima en la cubierta tiene un valor de 1.22 mm (Figura 17); los valores previos no afectarían el correcto funcionamiento de la grúa. El esfuerzo nominal máximo en la estructura para este tipo de carga es de 44,3 MPa ubicado en el cilindro superior. El nivel de esfuerzos en este caso es muy inferior al obtenido en el caso 1 por lo que no se considera a la grúa estibada como una condición de carga crítica. En general, los valores de esfuerzo en el pedestal son inferiores a 25 MPa (Figura 18 izquierda). No se reportan esfuerzos superiores a 120 MPa (Figura 18 derecha). Esta condición supone un nivel de esfuerzos menor a las encontradas en el caso 1 a pesar de que corresponde a un estado de mar superior.

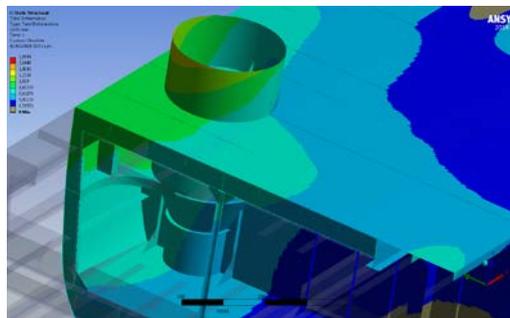


Figura 17. Deflexión en el modelo cuando la grúa está estibada

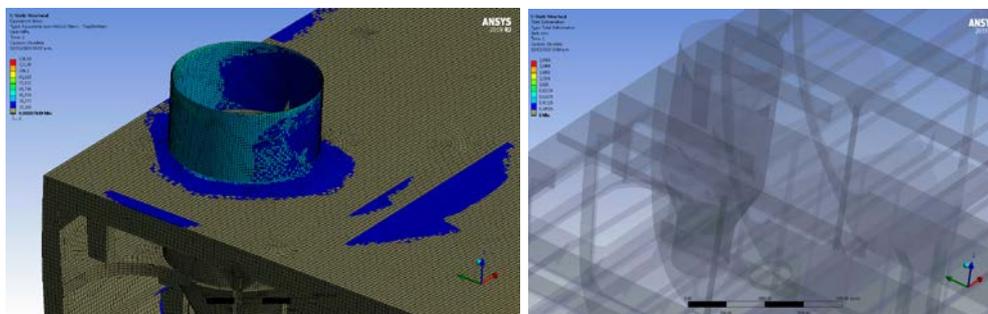


Figura 18. Nivel de esfuerzos (izquierda) y esfuerzos superiores a 120 MPa (derecha)

De los resultados previos se puede observar que la condición de cargas con la pluma ubicada a 90° es la que reporta el mayor nivel de esfuerzos en zonas focalizadas del cilindro de cubierta. No obstante, al ubicarse estos esfuerzos en una región de intersección de varios planos, no se descarta el efecto de una posible penetración de elementos shell en el cilindro con el elevado nivel de esfuerzos obtenido. A pesar de esto, se supone el nivel de esfuerzos que rodea la singularidad como real.

De esta forma, habría una región focalizada cuyo nivel de esfuerzos superaría el límite sugerido por la norma. Sin embargo, tal como se discutió previamente, la deformación plástica focalizada no compromete la resistencia promedio de la pieza, incluso, esta región puede obtener esfuerzos de fluencia mayores y cumplir los requisitos de norma al darse el fenómeno de endurecimiento por deformación. Por tales motivos, se tomó el esfuerzo equivalente nominal máximo como valor de referencia para comparar los resultados de las diferentes orientaciones de la pluma. A partir del esfuerzo nominal máximo se encontró que cuando la pluma se encuentra a 225° respecto a proa se dan los mayores niveles de esfuerzo (Tabla 14). Esta posición corresponde a la carga o descarga de contenedores sobre la región más alejada de la cubierta y los niveles de esfuerzo elevados se pueden deber a un menor efecto de los rigidizadores del casco sobre la estructura del pedestal. Respecto a la magnitud de las deflexiones obtenidas, a pesar de que las mayores deflexiones tienen lugar en el cilindro de cubierta, se toma la deflexión en cubierta como punto de comparación entre las diferentes orientaciones ya que esta tiene una verificación por norma [1]. En todos los casos de carga se cumple con las deflexiones máximas sugeridas por la sociedad clasificadora.

Tabla 14. Descripción de deflexiones y esfuerzos para la grúa estibada

Orientación	Deflexión máxima [mm]	Deflexión máxima cubierta [mm]	Esfuerzo equivalente nominal máximo [MPa]	Factor de seguridad
Caso 1: 45°	2,64	1,92	78,6	1,5
Caso 1: 90°	2,61	2,36	105,4	1,12
Caso 1: 135°	2,27	1,73	95,3	1,24
Caso 1: 180°	2,21	1,62	99,04	1,19
Caso 1: 225°	2,71	1,79	109,02	1,08
Caso 1: 270°	2,35	1,68	99,04	1,19
Caso 1: 315°	2,27	1,73	95,3	1,24
Caso 3: estibada	1,34	1,22	44,3	3,38

4. CONCLUSIONES

En el presente estudio se desarrolló un análisis estructural, de vibración libre y de pandeo lineal por el método de elementos finitos en el pedestal de la grúa que fue diseñado para el Buque de Apoyo Logístico y Cabotaje (BALC) con el fin de verificar el cumplimiento de las normas sugeridas por *Lloyd's Register* [4] y la efectividad de su arreglo estructural. Se puede concluir de los análisis previamente descritos que la estructura del pedestal distribuye la carga producto de la operación de la grúa de manera efectiva por la estructura del casco adyacente.

La estructura del pedestal presenta en general, para una condición de carga máxima y operaciones en estado de mar 2, esfuerzos equivalentes nominales menores a 118.5 MPa para el caso 1. Adicionalmente, El máximo esfuerzo equivalente de todos los casos representa únicamente un 44% del esfuerzo de fluencia y 23% del esfuerzo último del acero naval. Por ende, el pedestal cumple con el criterio de aceptación establecido por las normas de la casa clasificadora [4]. Con base en estos resultados, se recomienda mantener la grúa estibada para condiciones de mar superiores a la descrita.

Para el caso 3, en el cual la grúa se encuentra estibada, el análisis estructural muestra que los esfuerzos registrados son considerablemente inferiores al límite de 150 MPa sugerido por la norma [4]. El caso 3 está asociado a un estado de mar 3 con vientos de 63 m/s, por lo que se verifica la seguridad de la grúa estibada cuando la embarcación se encuentra en dicho estado de mar.

La deflexión de la cubierta, para las condiciones de carga en el caso 1, es menor al límite sugerido por la norma. En el caso más extremo, la deflexión máxima en cubierta es de 2,36 mm y representa el 21% del límite descrito en las consideraciones de la norma [4]. De esta manera, se asegura la operación de la grúa en estado de mar 2. Para el caso 3, la deflexión en cubierta cuando la grúa está estibada representa solamente el 11% del límite de deflexión sugerido en las normas.

Respecto al análisis modal se puede concluir que la menor frecuencia de resonancia reportada tiene un valor de 15,98 Hz y está localizada en el forro de la embarcación. De esta manera, se debe tener especial consideración en que la frecuencia de funcionamiento de los equipos principales de la embarcación debe ser menor a dicha frecuencia o tener los elementos de amortiguación necesarios.

De acuerdo con el análisis de pandeo lineal, al aplicarse una carga unitaria compresiva se obtuvo un factor multiplicador de $2,79 \times 10^6$. Este factor asegura que las cargas copresidas propias de la carga viva y muerta de la grúa no producirían el fenómeno de pandeo.

REFERENCIAS

- [1] Tupper, E. (2013). Introduction to Naval Architecture. Butterworth-Heinemann.
- [2] Hughes, O. y Paik, J. (2010). Basic Types of Structural Failure. *Ship Structural Analysis and Design*, 2(1), 2-11.
- [3] Mandal, N. (2017). Structural Requirement. *Ship Construction and Welding*. Springer.
- [4] Lloyd's Register. (2019). Code for Lifting Appliances in a Marine Environment. Lloyd's Register.
- [5] Lloyd's Register. (2019). Rules and regulations for the Classification of Special Service Craft. Lloyd's Register.
- [6] DNV-GL. (2015). Class Guideline DNVGL-CG-0127. Finite Element Analysis.
- [7] Almany, N. (2018). Ship and Structural Design and Analysis of Offshore Patrol Vessel. Técnico Lisboa.
- [8] Nieme, E. y Frikle, W. Maddox, S. (2018). Structural Hot-spot Stress Determination Using Finite Element Analysis. *Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components*. IIW Collection. Springer.
- [9] Svenninggaard, J. (2017) How to deal with the annoying Hot Spots in FEA. University College, Denmark.
- [10] Bai, Y. y Wei, J. (2015). *Marine Structural Design*. Butterworth-Heinemann.
- [11] Abbey, T. (2017). Dealing with Stress Concentrations and Singularities. DE 247 Digital Engineering. Recuperado: <https://www.digitalengineering247.com/article/dealing-stress-concentrations-singularities>.
- [12] Allan, R. (2011). *Structural Analysis for the Crane Seating and Supporting Structure*. Canada.
- [13] Schey, J. (2000). *Plastic Deformation of Metals. Introduction to manufacturing processes*. McGraw-Hill.
- [14] Banerjee, B. et al. (2018). Comparison of ANSYS elements SHELL 181 and SOLSH190. Parresua Research Limited. New Zealand.

Desempeño en mar de botes de planeo y su efecto sobre la integridad física de la tripulación

Roberto Algarín
Antonio Bula
Universidad del Norte
Colombia

El presente capítulo utiliza la teoría de cuerpos esbeltos para desarrollar un modelo matemático del desempeño en mar de botes de planeo en olas regulares e irregulares, los resultados se comparan con los datos experimentales en ensayos de canal de otros autores en términos de la amplitud de los movimientos y aceleraciones, se calcula la distribución de presiones, fuerza sobre el casco, movimientos, velocidades y aceleraciones de la embarcación. El modelo se usa para evaluar los efectos de las aceleraciones sobre los tripulantes de la embarcación, se acopla un modelo de silla amortiguada para reducir las cargas de impacto y se evalúan sus efectos sobre la columna de la tripulación en diferentes condiciones de estado de mar y velocidades de operación.

1. INTRODUCCIÓN

En la Armada Nacional de Colombia, los botes de planeo son usados para misiones de patrullaje, interdicción y rescate en ríos y mares. Estas embarcaciones pueden alcanzar velocidades cercanas a los 50kn, debido a las condiciones de operación se presentan cargas de impacto con las olas donde se pueden generar aceleraciones verticales superiores a los 20g al igual que el volcamiento de la embarcación, esto produce efectos negativos sobre la salud de la tripulación tales como fracturas en los miembros superiores e inferiores y lesiones de columna. Para mitigar el impacto sobre los tripulantes se utilizan asientos amortiguados que pueden reducir hasta en un 75% las cargas sobre el pasajero de acuerdo con [10]. El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta que permita evaluar el desempeño en mar de botes de planeo en olas irregulares, cargas y presiones sobre la estructura de la embarcación, al igual que las fuerzas de impacto a las se encuentra sometida la tripulación y sus efectos sobre la columna en las distintas condiciones de trabajo.

Zarnick [11, 12] desarrolló un modelo semi-empírico para el estudio de desempeño en mar de embarcaciones de planeo en olas regulares e irregulares, usó la teoría de masa adherida y la teoría de cuerpos esbeltos para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas en el bote, resolvió el sistema de ecuaciones numéricamente calculando los movimientos, velocidades y aceleraciones de la embarcación en el plano vertical. Garme [5, 6] propuso un factor de corrección para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas e hidrostáticas de botes de planeo debido a la succión en la popa y desarrolló un modelo de desempeño en mar basado en Zarnick [11]. Olausson et al. [14] extendieron el modelo de desempeño en mar de Garme [6], acoplaron un modelo dinámico de silla amortiguada y evaluaron el esfuerzo de compresión en la columna de tripulantes para diversos perfiles de operación de botes navegando en olas irregulares; otros autores como [3, 18, 20, 21] han elaborado modelos de la dinámica de botes de planeo en el plano vertical. Coe et al. [13] desarrollaron un modelo simplificado para sillas amortiguadas con tres grados libertad, encontraron los coeficientes de amortiguamiento y de resorte óptimos para los diferentes grados de libertad y los compararon con sillas comerciales.

Wice [15] desarrolló un modelo con dos grados de libertad para sillas amortiguadas de embarcaciones de planeo, realizó experimentos en sillas amortiguadas comerciales y obtuvo las constantes del modelo, los resultados se validaron experimentalmente mediante ensayos de caída libre en torres y datos experimentales de embarcaciones de planeo. Townsend et al. [16] evaluaron la influencia de la rigidez del casco de embarcaciones de alta velocidad en la exposición a vibraciones de tripulantes de botes de planeo. De Alwis [17] evaluó las diferentes normas y métodos para cuantificar los daños producidos por la exposición a vibraciones en embarcaciones de alta velocidad, acuerdo a su estudio la norma ISO 2631-5:2004 [8] es la más apropiada para el análisis de bote de planeo. Savitsky [19] realizó pruebas de canal donde evaluó la fuerza de sustentación, el momento de trimado y el centro de presión en cascos de planeo navegando en condición estable. Seo et al. [23] llevaron a cabo ensayos de canal donde evaluaron un nuevo diseño de casco, realizaron diferentes pruebas para optimizar la posición de *spray rails* reduciendo de esta manera la resistencia al avance y la amplitud de los movimientos y aceleraciones en olas irregulares. De Luca et al. [22] llevaron a cabo una serie de experimentos en canal en olas irregulares, variaron el estado de mar, la velocidad de operación y el tipo de casco, encontraron la repuesta en los movimientos de cabeceo, levantamiento y aceleraciones verticales para cinco modelos diferentes evaluando la influencia de la relación de esbeltez del bote.

2. MÉTODO

Algarín & Tascón [1] desarrollaron un modelo para evaluar la aptitud dinámica de botes de planeo en agua en calma, para ello aplicaron la teoría de cuerpos esbeltos y flujo potencial. La Figura 1 muestra un bote atravesando una ola, L_{cdg} y V_{cdg} son la posición longitudinal y vertical del CG, Z_{cdg} es la elevación del CG respecto a la línea de agua, h_o es la elevación de la ola, D es el calado y θ es el ángulo de trimado del bote, x e z son coordenadas fijas en el bote con origen en la intercepción de la quilla y el espejo de popa. Acoplando los movimientos de trimado, elevación y la incidencia de la ola se determina el calado y la inmersión de cada sección mediante las ecuaciones (1) y (2).

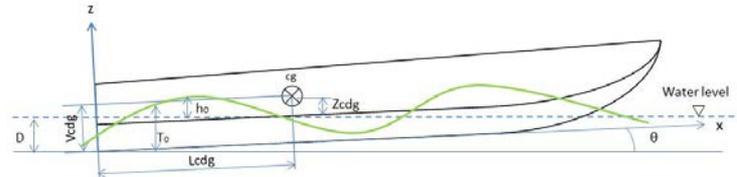


Figura 1. Parámetros geométricos de bote en olas

$$D = L_{cdg} \sin \theta + V_{cdg} \cos \theta - z_{cdg} \quad (1)$$

$$T_0 = D - (x \sin \theta + z_1 \cos \theta) + h_o \quad (2)$$

Donde z_1 es la altura de la sección respecto a la línea base, T_0 es la inmersión de la sección. Sustituyendo y haciendo $\cos \theta \approx 1$, la inmersión de cada sección del bote se evalúa con la ecuación (3).

$$T_0 = h_o - (x - L_{cdg}) \sin \theta + (V_{cdg} - z_1) - z_{cdg} \quad (3)$$

La velocidad de impacto local se calcula con la ecuación (4).

$$w = \frac{DT_0}{Dt} = \frac{dT_0}{dt} - U \frac{dT_0}{dx} \quad (4)$$

Donde U es la velocidad de avance del bote y t es el tiempo, evaluando y simplificando se obtiene la ecuación (5).

$$w = \dot{h}_o - (x - L_{cdg})(\dot{\theta}) - \dot{z}_{cdg} + U \left(\sin \theta + \frac{dz_1}{dx} - \frac{dh_o}{dx} \right) \quad (5)$$

Donde \dot{h}_o es la velocidad vertical de la ola, $\dot{\theta}$ es velocidad angular del bote, \dot{z}_{cdg} es la velocidad vertical del bote en el cg. La aceleración de impacto de la sección se define con la ecuación (6).

$$\dot{w} = \frac{Dw}{Dt} = \frac{dw}{dt} - U \frac{dw}{dx} \quad (6)$$

Reemplazando y simplificando se obtiene la ecuación (7).

$$\dot{w} = \ddot{h}_o - (x - L_{cdg})(\ddot{\theta}) - \ddot{z}_{cdg} + 2U \left(\dot{\theta} - \frac{d\dot{h}_o}{dx} \right) + U^2 \left(-\frac{d^2z_1}{dx^2} + \frac{d^2h_o}{dx^2} \right) \quad (7)$$

2.1 Modelo de olas

Para las olas regulares se usó el modelo sinusoidal. Para una altura y periodo de ola H y T_w , se calculan los parámetros de ola de la ecuación (8).

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{g}{2\pi} T_w^2 \\ U_w &= \frac{\lambda}{T_w} \\ \omega &= \frac{2\pi}{T_w} \\ \omega_e &= \omega \left(1 + \frac{U}{U_w} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Donde λ es la longitud de la ola, U_w es la velocidad de la ola, ω es la frecuencia de la ola, ω_e es la frecuencia de encuentro, el perfil de la ola en el tiempo se calcula con la ecuación (9).

$$\begin{aligned} h_o &= A_0 \sin(\omega_e t + kx + \delta_w) \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda} \\ H &= 2A_0 \end{aligned} \quad (9)$$

Donde δ_w es el ángulo de fase de la ola, A_0 es la amplitud, H es la altura y k es el número de ola, derivando respecto al tiempo y el espacio se obtiene la ecuación (10).

$$\begin{aligned} \dot{h}_o &= A_0 \omega_e \cos \left(\omega_e t + \frac{2\pi}{\lambda} x + \delta \right) \\ \ddot{h}_o &= -A_0 \omega_e^2 \sin \left(\omega_e t + \frac{2\pi}{\lambda} x + \delta \right) \\ \frac{d\dot{h}_o}{dx} &= -A_0 \frac{2\pi}{\lambda} \omega_e \sin \left(\omega_e t + \frac{2\pi}{\lambda} x + \delta \right) \\ \frac{dh_o}{dx} &= A_0 \frac{2\pi}{\lambda} \cos \left(\omega_e t + \frac{2\pi}{\lambda} x + \delta \right) \\ \frac{d^2h_o}{dx^2} &= -A_0 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sin \left(\omega_e t + \frac{2\pi}{\lambda} x + \delta \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Las olas irregulares se modelan linealmente, y el perfil de la ola en el tiempo se puede evaluar con la ecuación (11).

$$h_0 = \sum_{j=1}^{j=N} A_j \sin(\omega_j t + k_j x + \delta_j) \quad (11)$$

Donde A_j , ω_j , k_j y δ_j son la amplitud, frecuencia, número de ola y ángulo de fase de la componente de ola j . Las olas se representan estadísticamente con un espectro de ola "s", el cual se relaciona con la amplitud con la ecuación (12).

$$\frac{1}{2} A_j^2 = S(\omega_j) \Delta\omega \quad (12)$$

El ángulo de fase δ toma valores aleatorios de 0 a 2π , los distintos parámetros para la aceleración y velocidad de la ola se calculan con la ecuación (13).

$$\begin{aligned} \dot{h}_0 &= \sum_{j=1}^n A_j \omega_j \cos\left(\omega_j t + \frac{2\pi}{\lambda_j} x + \delta_j\right) \\ \ddot{h}_0 &= -\sum_{j=1}^n A_j \omega_j^2 \sin\left(\omega_j t + \frac{2\pi}{\lambda_j} x + \delta_j\right) \\ \frac{dh_0}{dx} &= -\sum_{j=1}^n A_j \frac{2\pi}{\lambda_j} \omega_j \sin\left(\omega_j t + \frac{2\pi}{\lambda_j} x + \delta_j\right) \\ \frac{dh_0}{dx} &= \sum_{j=1}^n A_j \frac{2\pi}{\lambda_j} \cos\left(\omega_j t + \frac{2\pi}{\lambda_j} x + \delta_j\right) \\ \frac{d^2 h_0}{dx^2} &= -\sum_{j=1}^n A_j \left(\frac{2\pi}{\lambda_j}\right)^2 \sin\left(\omega_j t + \frac{2\pi}{\lambda_j} x + \delta_j\right) \end{aligned} \quad (13)$$

Los espectros de ola, en función de la frecuencia, se programaron de acuerdo a Pierson -Moskowitz y JONSWAP de NATO. El espectro Pierson -Moskowitz con la ecuación (14).

$$\begin{aligned} \frac{S(\omega)}{H_{1/3} T_1} &= \frac{0.11}{2\pi} \left(\frac{\omega T_1}{2\pi}\right)^{-5} e^{-0.44\left(\frac{\omega T_1}{2\pi}\right)^{-4}} \\ T_0 &= 1.529 T_1 \end{aligned} \quad (14)$$

Donde $H_{1/3}$ es la altura significativa de la ola y T_0 el periodo modal. El espectro de Ola JONSWAP con la ecuación (15).

$$\begin{aligned} S(\omega) &= 155 \frac{H_{1/3}^2}{T_1^4 \omega^5} e^{\left(\frac{-994}{T_1^4 \omega^4}\right)} 3.3^Y \\ Y &= e^{\left[-\left(\frac{0.191\omega T_1 - 1}{2.2\sigma}\right)^2\right]} \\ \sigma &= \begin{cases} \omega \leq \frac{5.24}{T_1} & 0.07 \\ \omega \geq \frac{5.24}{T_1} & 0.09 \end{cases} \\ T_1 &= 0.834 T_0 \end{aligned} \quad (15)$$

2.2 Cálculo de fuerzas

La Figura 2 muestra las fuerzas que actúan sobre el bote. Se observan la propulsión T , la fuerza hidrodinámica normal a la quilla F_N , el momento hidrodinámico M_{HD} , el peso mg y la fuerza de arrastre viscosa F_v , d_v es la distancia entre la línea de acción de la fuerza y el centro de gravedad. La fuerza hidrodinámica normal a la quilla con la ecuación (16).

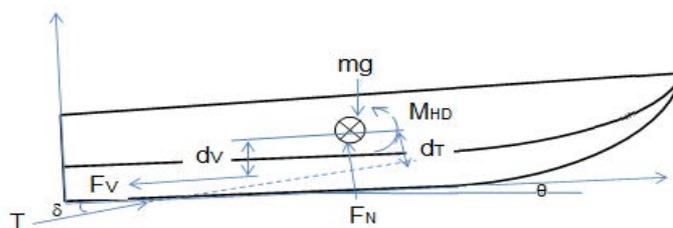


Figura 2. Diagrama de fuerzas sobre bote de planeo

$$F_N = (M_1 \sin\theta) \dot{U} - M_1 \ddot{z}_{cdg} + 2M_1 U \dot{\theta} - M_2 \ddot{\theta} + F'_N \quad (16)$$

Donde M_1 , M_2 y F'_N se definen con la ecuación (17).

$$M_1 = \int_0^l c_{tr}(x) m_a dx, M_2 = \int_0^l (x - L_{cdg}) c_{tr}(x) m_a dx$$

$$F'_N = \int_0^l \left[2U \left(\dot{\theta} - \frac{dh_0}{dx} \right) \right] c_{tr}(x) m_a dx + \int_0^l U^2 \left(-\frac{d^2 z_1}{dx^2} + \frac{d^2 h_0}{dx^2} \right) c_{tr}(x) m_a dx + \int_0^l c_{tr}(x) f'_z dx \quad (17)$$

Donde $c_{tr}(x)$ es el coeficiente de succión de presión de la popa, definido acuerdo a Garme [6] en la ecuación (18).

$$c_{tr}(x) = \tanh \left(\frac{2.5}{0.34B C_v} x \right) \quad (18)$$

Donde f'_z es una fuerza seccional la cual se evalúa con la ecuación (19).

$$f'_z = f'_{HD} + f_{HS} + f_v \quad (19)$$

Donde f'_{HD} es la fuerza hidrodinámica seccional, f_{HS} es la fuerza hidrostática y f_v es la fuerza viscosa. f'_{HD} se calcula con la ecuación (20).

$$f'_{HD} = -\dot{w} m_a + f_{HD} \quad (20)$$

Donde f_{HD} es la fuerza hidrodinámica total seccional, m_a es la masa adherida y se calcula con la ecuación (21).

$$m_a = \rho \int_{-y_1}^{y_1} \sqrt{c^2 - y^2} dy \quad (21)$$

Donde ρ es la densidad y_1 es el punto donde la presión en la sección se hace cero, c es la semi-manga húmeda como se muestra en la Figura 3, y es un eje perpendicular al plano de simetría xz .

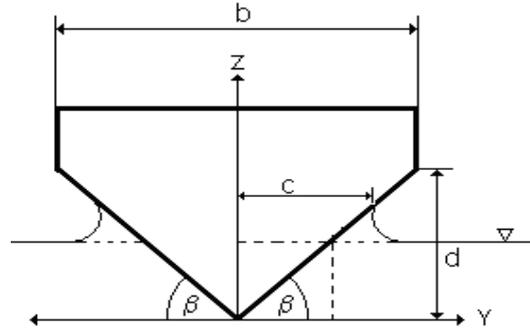


Figura 3. Sección del bote

La fuerza f'_{HD} se evalúa con la ecuación (22).

$$f'_{HD} = \rho w \int_{-y_1}^{y_1} \frac{c\dot{c}}{\sqrt{c^2 - y^2}} dy - \rho \frac{w^2}{2} \int_{-y_1}^{y_1} \frac{y^2}{c^2 - y^2} dy \quad (22)$$

La semi-manga húmeda y su variación se calculan con la ecuación (23).

$$c = \begin{cases} T_0 \leq \frac{2}{\pi} d & \frac{\pi}{2} \frac{T_0}{\tan \beta} \\ T_0 > \frac{2}{\pi} d & \sqrt{\left(\frac{b}{2} \right)^2 + \left[\frac{3}{2} w \left(\frac{b}{2} \right)^2 (T_0 - d) \right]^{2/3}} \end{cases} \quad (23)$$

$$\dot{c} = \begin{cases} T_0 \leq \frac{2}{\pi} d & \frac{\pi D}{2 D_t} \left(\frac{T_0}{\tan \beta} \right) \\ T_0 > \frac{2}{\pi} d & \frac{w}{2} \frac{\left(\frac{b}{2} \right)^2}{c \sqrt{c^2 - \left(\frac{b}{2} \right)^2}} \end{cases}$$

Donde d es la distancia quilla codillo, β el ángulo de astilla muerta, y b es la manga de la sección como se muestra en la figura 3. La distribución de presión dinámica en el casco que puede calcular con la ecuación (24).

$$\frac{p}{\rho} = \dot{w} \sqrt{c^2 - y^2} + \frac{w c \dot{c}}{\sqrt{c^2 - y^2}} - \frac{w^2}{2} \frac{y^2}{c^2 - y^2} \quad (24)$$

La fuerza hidrostática, f_{HS} , la fuerza seccional viscosa f_v , y la fuerza de arrastre viscosa F_V , se calculan las ecuaciones (25) a (27).

$$f_{HS} = \rho g A_s \quad (25)$$

$$f_v = \frac{1}{2} \rho C_d (2y_1) w^2 \quad (26)$$

$$F_v = \frac{1}{2} \rho C_f A U^2 \quad (27)$$

Donde g es la gravedad, A_s es el área sumergida de la sección, y C_d es el coeficiente de arrastre seccional, el cual toma valores mostrados en la ecuación (28).

$$C_d = \begin{cases} w \geq 0, C_d = 0.5 \\ w < 0, C_d = -1.0 \end{cases} \quad (28)$$

Donde C_f es el coeficiente de fricción calculado a partir de ITTC 1957 [9], y A es el área húmeda de barco. El momento hidrodinámico en el centro de gravedad del buque se calcula con la ecuación (29).

$$M_{HD} = (M_2 \sin \theta) \dot{U} - M_2 \ddot{z}_{cdg} + 2M_2 U \dot{\theta} - M_3 \ddot{\theta} + M'_{HD} \quad (29)$$

Donde M_3 y M'_{HD} se evalúan con la ecuación (30).

$$M_3 = \int_0^l (x - L_{cdg})^2 c_{tr}(x) m_a dx$$

$$M'_{HD} = - \int_0^l \left[2U \left(\dot{\theta} - \frac{dh_o}{dx} \right) \right] c_{tr}(x) m_a dx + \int_0^l \left[U^2 \left(-\frac{d^2 z_1}{dx^2} + \frac{d^2 h_o}{dx^2} \right) \right] c_{tr}(x) m_a dx + \int_0^l (x - L_{cdg}) c_{tr}(x) f'_z dx \quad (30)$$

La sumatoria de fuerzas en x , y y z se presentan en las ecuaciones (31) a (33).

$$\sum F_x = T \sin(\theta + \delta) - F_N \sin \theta - F_v \cos \theta = M \ddot{x}_{cdg} \quad (31)$$

$$\sum M_y = M_{HD} - d_v F_v + d_t T = I_{yy} \ddot{\theta} \quad (32)$$

$$\sum F_z = F_N \cos \theta - F_v \sin \theta + T \sin(\theta + \delta) - Mg = M \ddot{z}_{cdg} \quad (32)$$

Donde I_{yy} es el segundo momento de inercia del bote sobre el eje y . Acoplando las ecuaciones de movimiento se tiene la ecuación (34).

$$\begin{bmatrix} M + M_2 \sin^2 \theta & M - M_1 \sin \theta & M_2 \sin \theta \\ -M_1 \sin \theta \cos \theta & M + M_1 \cos \theta & M_2 \cos \theta \\ -M_2 \sin \theta & M_2 & I_{yy} + M_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{cdg} \\ \ddot{z}_{cdg} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \cos(\theta + \delta) - (F'_N + 2M_1 U \dot{\theta}) \sin \theta - F_v \sin \theta \\ (F'_N + 2M_1 U \dot{\theta}) \cos \theta - F_v \sin \theta + T \sin(\theta + \delta) - Mg \\ M'_{HD} - d_v F_v + d_t T \end{bmatrix} \quad (34)$$

Cuando el bote se mueve con velocidad de avance constante se obtiene la ecuación (35).

$$\begin{bmatrix} M + M_1 \cos \theta & M_2 \cos \theta \\ M_2 & I_{yy} + M_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_{cdg} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (F'_N + 2M_1 U \dot{\theta}) \cos \theta - F_v \sin \theta + T \sin(\theta + \delta) - Mg \\ M'_{HD} - d_v F_v + d_t T \end{bmatrix} \quad (35)$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Desempeño en olas regulares

Fridsma [4] realizó ensayos de canal y evaluó la respuesta en olas regulares de botes de planeo, determinando la amplitud de los movimientos, aceleraciones y el ángulo de fase respecto a la ola. Este autor es usado para validar el modelo matemático definiendo los parámetros mostrados en la ecuación (36).

$$RAO_{heave} = \frac{h_{max} - h_{min}}{H}$$

$$RAO_{pitch} = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{\left(\frac{2\pi H}{\lambda} \right)}$$

$$C_\Delta = \frac{\Delta}{\rho g B^3} \quad (36)$$

$$C_v = \frac{U}{\sqrt{gB}}$$

$$C_\lambda = \frac{L}{\lambda^3 \sqrt{\frac{C_\Delta}{\left(\frac{L}{B} \right)^2}}}$$

Donde RAO es el operador de respuesta en amplitud que relaciona la amplitud de salida respecto a la de entrada, h_{max} y h_{min} son la elevación máxima y mínima del buque en arfada, θ_{max} y θ_{min} son el ángulo máximo y mínimo de trimado,

C_{Δ} es el coeficiente de carga, Δ es el desplazamiento, ρ es la densidad del fluido, C_v es el coeficiente de velocidad, C_{λ} es el numero adimensional de longitud de ola, L y B son la eslora y la manga del bote.

La Figura 4 muestra los resultados del desempeño en olas regulares de un bote con las siguientes condiciones: $\beta=20^{\circ}$, $C_{\Delta}=0.608$, $L_{cdg}/B=1.725$, $V_{cdg}/B=0.294$, $H/B=0.111$ y $C_v=2.66$, el radio de giro del bote es $k_{yy}/B=1.31$. Los resultados se comparan con Fridsma [4] y muestran gran similitud en las amplitudes del movimiento, ángulos de fase y aceleraciones.

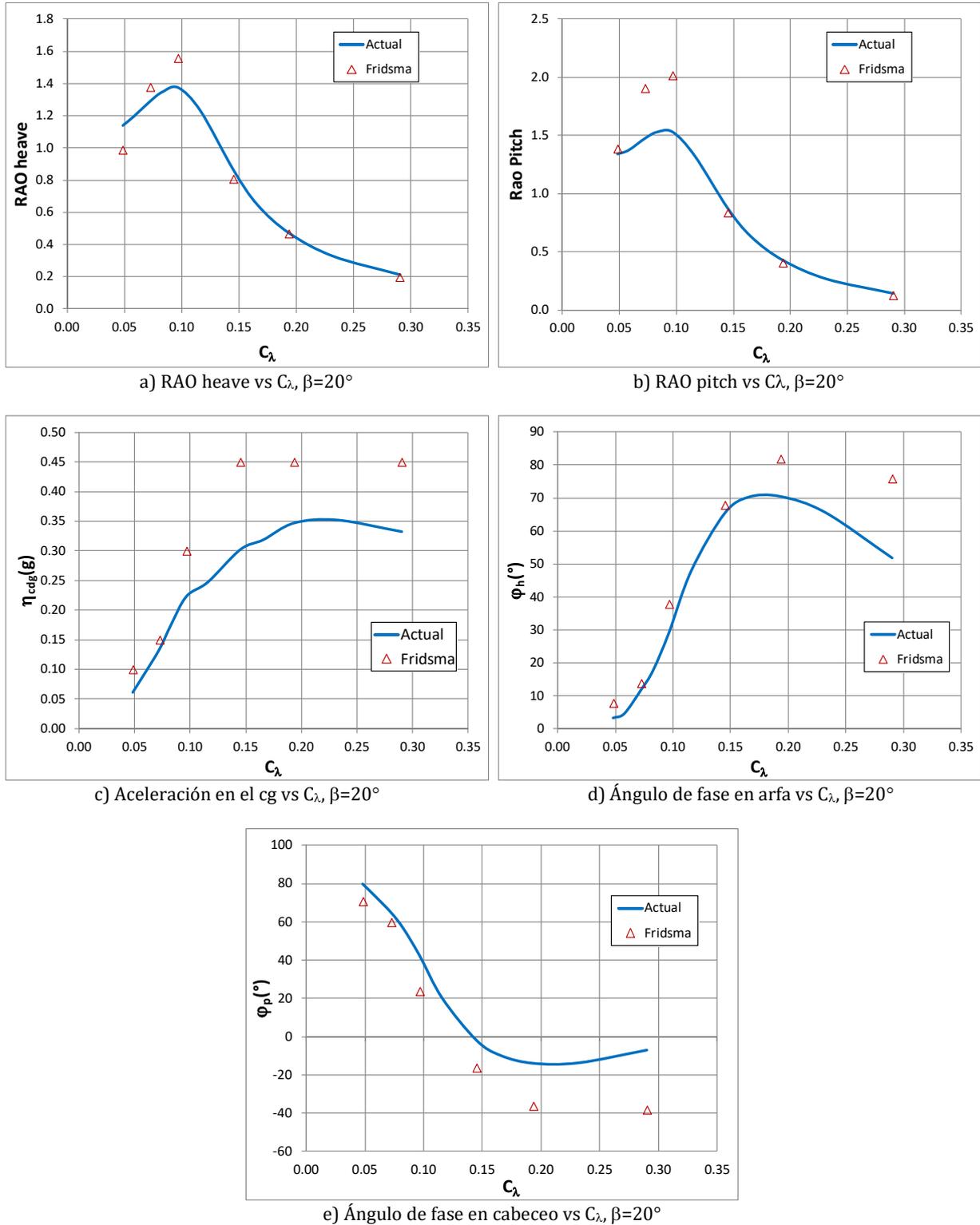


Figura 4. Resultados en olas regulares. $\beta=20^{\circ}$, $C_{\Delta}=0.608$, $L_{cdg}/B=1.725$, $V_{cdg}/B=0.294$, $H/B=0.111$ y $C_v=2.66$, y $k_{yy}/B=1.31$

La Figura 5 muestra los resultados del desempeño en olas regulares de un bote con las siguientes condiciones: $\beta=30^{\circ}$, $C_{\Delta}=0.608$, $L_{cdg}/B=1.975$, $V_{cdg}/B=0.294$, $H/B=0.111$, $C_v=3.99$ y $k_{yy}/B=1.24$. Los resultados se comparan con Fridsma [4] y muestran gran similitud en las amplitudes del movimiento, ángulos de fase y aceleraciones.

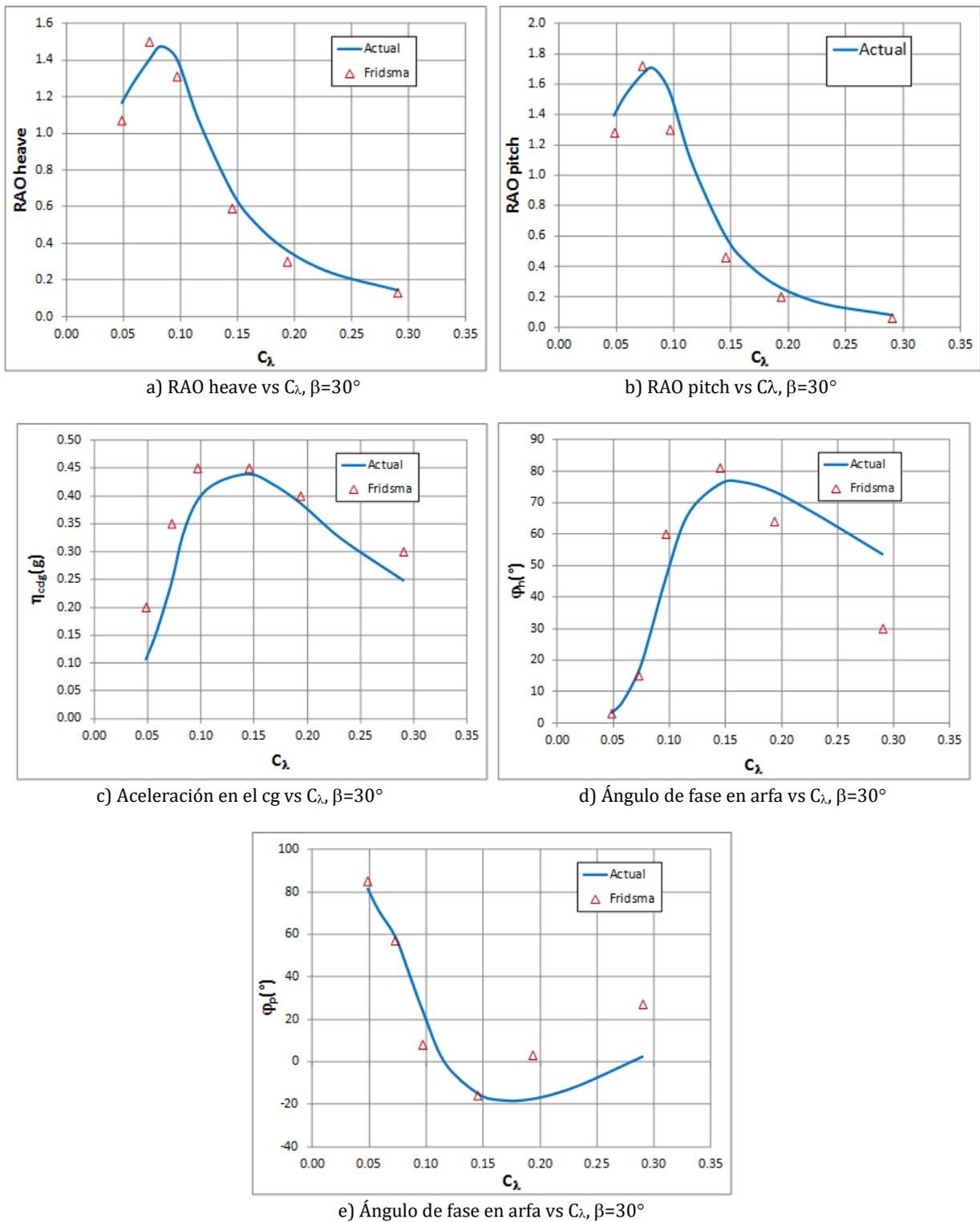
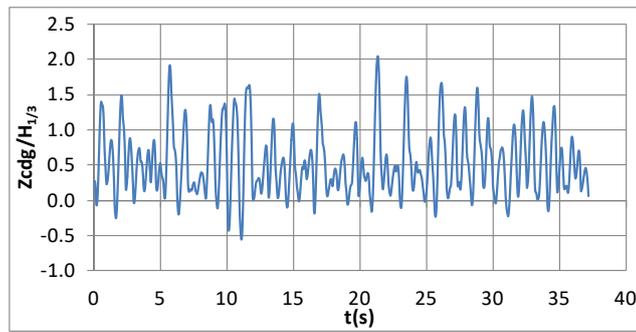


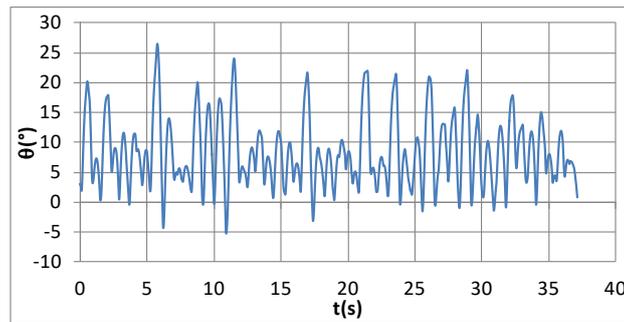
Figura 5. Resultados en olas regulares. $\beta=30^\circ$, $C_\Delta=0.608$, $L_{cdg}/B=1.975$, $V_{cdg}/B=0.294$, $H/B=0.111$, $C_v=3.99$ y $k_{yy}/B=1.24$

3.2 Desempeño en olas irregulares

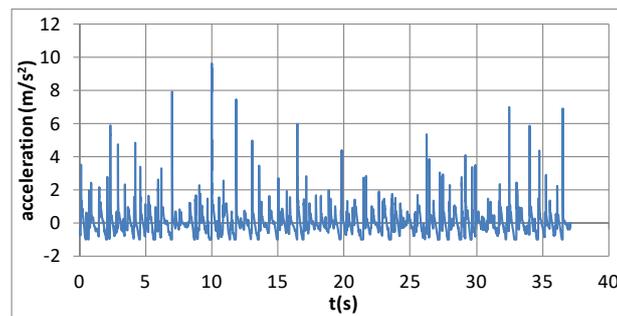
Fridsma [5] evaluó el desempeño de botes de planeo en mar con olas irregulares, utilizando espectro Pierson – Moskowitz. La Figura 6 muestra las series de tiempo de arfada, cabeceo y aceleración vertical de una simulación para una condición experimental de Fridsma [5]. Los parámetros de la simulación son: $\beta=20^\circ$, $C_v=2,66$, $C_\Delta=0,60$, $H_{1/3}/B=0,666$, $L/B=5$, $L_{cdg}/B=2.04$, $V_{cdg}/B=0,294$ y $k_{yy}/B=1,22$. La Figura 7 muestra los resultados de la distribución de presión en olas irregulares para el caso anteriormente descrito, la presión es calculada en el instante de máxima aceleración vertical (9,62g) y mayor fuerza durante el impacto, este resultado puede usado para evaluar la estructura del buque en condiciones críticas. Los resultados de la serie de tiempo se utilizaron para evaluar los estadísticos $\eta_{3-1/10}$, $\eta_{5-1/10}$ y $a_{1/10}$ que representan el promedio de la décima parte de los picos de mayor valor en los movimientos de arfada, cabeceo y aceleración vertical en el CG. Los resultados encontrados se comparan con Fridsma [5] y se muestran en la Tabla 1 obteniendo gran similitud.



a) Zcdg vs t



b) θ vs t



c) Aceleración vs t

Figura 6. Resultados en olas irregulares. $\beta=20^\circ$, $C_v=2.66$, $C_\Delta=0.60$, $H_{1/3}/B=0.666$, $L/B=5$, $L_{cdg}/B=2.04$, $V_{cdg}/B=0.294$ y $k_{yy}/B=1.22$

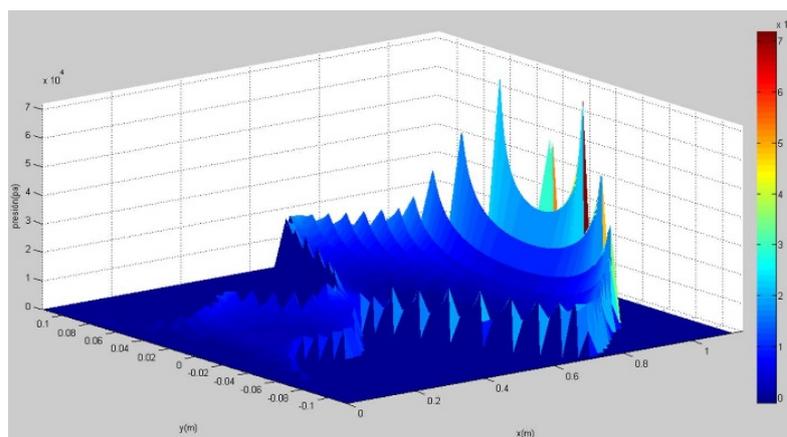


Figura 7. Distribución presión en el casco en la condición crítica

Tabla 1. Resultados de desempeño en mar

$H_{1/3}/B$	Autor	$\eta_{3-1/10}/H_{1/3}$	$\eta_{5-1/10}$	$a_{cg-1/10}$
0.222	Fridsma	0.719	5.356	1.485
	Actual	1.372	12.072	3.173
0.444	Fridsma	1.217	11.200	2.343
	Actual	1.258	15.311	4.636
0.667	Fridsma	1.127	14.469	3.455

3.3 Análisis de carga sobre tripulantes

La Figura 8 muestra el diagrama de fuerzas sobre una silla amortiguada, la sumatoria de fuerzas en la silla se muestra en la ecuación (37).

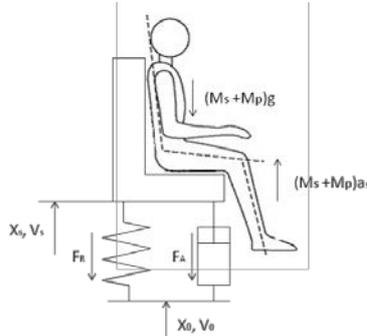


Figura 8. Diagrama de cuerpo libre sobre el asiento

$$\sum F = -F_R - F_A - (M_s + M_p)g = (M_s + M_p)a_s \quad (37)$$

Donde F_R es la fuerza en el resorte, F_A es la fuerza en el amortiguador, M_s es la masa de la silla y M_p es la masa de la persona, a_s es la aceleración de la silla, la fuerza en el resorte se evalúa con la ecuación (38).

$$F_R = k_s(x_s - h_s - x_0) \quad (38)$$

Donde k_s es la constante del resorte x_s es el desplazamiento de la silla, x_0 es el desplazamiento del bote en el anclaje de la silla, h_s es altura estática de la silla, la fuerza en el amortiguador se calcula con la ecuación (39).

$$F_A = b_s(V_s - V_0) \quad (39)$$

Donde b_s es coeficiente de amortiguamiento V_s es la velocidad de la silla y V_0 es la velocidad en el punto de anclaje de la silla. Sustituyendo se obtiene la ecuación (40).

$$-k_s(x_s - h_s - x_0) - b_s(V_s - V_0) - (M_s + M_p)g = (M_s + M_p)a_s \quad (40)$$

La velocidad y posición del punto de anclaje de la silla se calculan con la ecuación (41), donde L_s es la posición longitudinal de la silla.

$$\begin{aligned} x_0 &= Z_{cdg} + (L_s - L_{cdg}) \cos(\theta) \\ v_0 &= \dot{Z}_{cdg} + (L_s - L_{cdg}) \dot{\theta} \end{aligned} \quad (41)$$

La Figura 9 muestra los resultados de aceleración vertical en el anclaje y en la silla para las condiciones descritas en la Tabla 2. Para ello se utilizó el espectro de Ola Pierson -Moskowitz. Se observa que la silla amortiguada reduce los picos de aceleraciones hasta en un 70%.

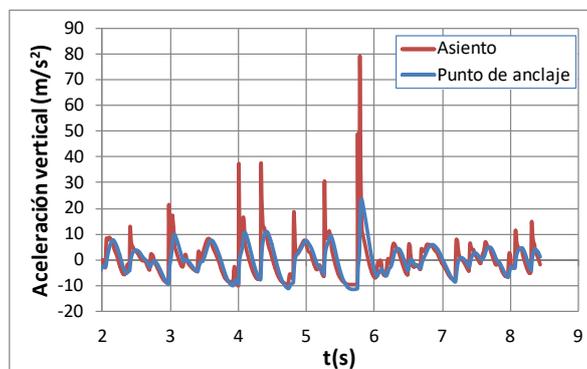


Figura 9. Aceleración vs tiempo

La norma ISO 2631-5 [8] (Tabla 3) permite evaluar la probabilidad de lesiones en personas sometidas a vibraciones cuerpo completo, relaciona la aceleración en el asiento del tripulante con la aceleración en la columna y el esfuerzo de compresión equivalente (S_{ed}) en esta, además establece los valores críticos del nivel de esfuerzo que causan daños sobre la columna.

Tabla 2. Condiciones de prueba

C_v	2,66
C_Δ	0,608
$\beta(^{\circ})$	20
L_{cdg}/B	1,900
K_{yy}/B	1,275
H_s/B	0,666
$(M_t+M_p)/\rho B^3$	0,0084
$K_s/((M_t+M_p)g/B)$	2,330
$B_s/(M_t+M_p)(g/B)^{1/2}$	0,965
L_s	L_{cdg}

Tabla 3. Criterios de norma ISO 2631-5 [8]

Valor	Efectos
$S_{ed}<0.5MPa$	Baja posibilidad de efectos adversos en la salud
$S_{ed}>0.8MPa$	Alta posibilidad de efectos adversos en la salud
$R<0.8$	Baja posibilidad de efectos adversos en la salud
$R>1.2$	Alta posibilidad de efectos adversos en la salud

En la norma se define los parámetros mostrados en las ecuaciones (42) a (47).

$$D_k = \left[\sum_i A_{ik}^6 \right]^{1/6} \quad (42)$$

Donde D_k es la cuota de aceleración, A_{ik} es el pico de aceleración i en la columna en la dirección k , k es un contador que indica la dirección, puede tomar valores de 1, 2 y 3, i es un contador de la cantidad de picos. La cuota de aceleración diaria se calcula con la ecuación (43).

$$D_{kd} = D_k \left[\frac{t_d}{t_m} \right]^{1/6} \quad (43)$$

Donde D_{kd} es la cuota de aceleración diaria, t_d es el tiempo de exposición diario, t_m es el tiempo de muestreo de las aceleraciones, el esfuerzo de compresión estático equivalente diario en la columna se calcula con la ecuación (44).

$$S_{ed} = \left[\sum_k [m_k D_{kd}]^6 \right]^{1/6} \quad (44)$$

Donde S_{ed} es el esfuerzo de compresión estático equivalente diario en la columna. R y m_k se definen con las ecuaciones (45) y (46).

$$m_k = \begin{cases} m_x = 0.015 \frac{MPa}{\frac{m}{s^2}} \\ m_y = 0.035 \frac{MPa}{\frac{m}{s^2}} \\ m_z = 0.032 \frac{MPa}{\frac{m}{s^2}} \end{cases} \quad (45)$$

$$R = \left[\sum_{i=1}^n \left[\frac{S_{ed} N^{1/6}}{S_{ui} - C} \right]^6 \right]^{1/6} \quad (46)$$

Donde N es el número de exposiciones por año, n es el número de años de exposición, C es el esfuerzo de compresión estático en la columna, S_{ui} es la resistencia última de la columna, la cual es función de la edad y se define con la ecuación (47).

$$S_{ui} = 6.75 - 0.066(b_0 + i) \quad (47)$$

Donde b_0 es la edad inicial, i es un contador que representa el año de exposición. Para evaluar el riesgo de lesiones en tripulantes se corrieron simulaciones con las condiciones del mar en un bote a escala real con las características de trabajo de la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de trabajo del tripulante

b ₀	20 años
N	20 años
t _d	6h
N	240
C	0.25 MPa

Las simulaciones se corrieron para un bote de planeo de 12m de eslora, ángulo de astilla muerta de $\beta=25^\circ$, $L_{cdg}=3.69m$, $V_{cdg}=0.75m$, $M_s=50$ kg, $M_t=80$ kg, $k_s=1062$ N/m, $B_s=212.4$ N.s/m. Estados de mar 2, 3 y 4 con el espectro de ola Jhonswap. La Tabla 5 muestran el riesgo de lesiones de columna en tripulantes del bote para velocidades de operación de 20 kn, 30 kn, 40 kn y 50kn y estados de mar 2, 3 y 4 acuerdo a Bales [2]. Para condición de mar 3 y 4 existe un alto riesgo de lesiones de columna. Mientras que para el estado de mar 2 existe riesgo es bajo.

Tabla 5. Resultados de esfuerzos en la columna

Estado de Mar	H _s (m)	T _m (s)	U (kn)	S _{ed} (Mpa)	R	Riesgo
2	0.3	7.5	20	0.0947	0.0889	Bajo
			30	0.131	0.127	Bajo
			40	0.156	0.146	Bajo
			50	0.193	0.181	Bajo
3	0.88	7.5	20	1.250	1.174	Moderado
			30	1.6536	1.5523	Alto
			40	1.938	1.819	Alto
			50	2.778	2.608	Alto
4	1.88	8.8	20	2.051	1.926	Alto
			30	2.6031	2.4436	Alto
			40	3.6851	3.4593	Alto
			50	15.4343	14.489	Alto

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo matemático que describe la dinámica de botes de planeo en olas regulares e irregulares, el modelo se validó mediante comparaciones con los experimentos de canal de Fridsma [4] y Fridsma [5] obteniendo gran similitud en los resultados, el modelo desarrollado permite evaluar presiones y fuerzas sobre la estructura del casco de la embarcación.

Se acopló un modelo matemático de sillas amortiguadas y se evaluó las aceleraciones sobre la tripulación del bote.

Se utilizó la norma ISO 2631-5[8] para calcular los esfuerzos de compresión en la columna de los tripulantes y se evaluó el riesgo de padecer lesiones permanente en la columna, para una condición típica de trabajo se obtuvo que para los estados de mar 3 y 4 hay riesgo moderado y alto de lesiones en la columna en régimen de planeo, por lo cual se debe reducir el tiempo de exposición diario y el número de años de exposición en estas condiciones para reducir el riesgo de lesiones en los tripulantes.

REFERENCIAS

- [1] Algarín, R. y Tascón, O. (2014). Analysis of the dynamic of planning craft on the vertical plane. *Ship Science and Technology* 8(15), 35-43.
- [2] Bales, S. (1982). Designing ship to the natural environment. En 19th annual technical symposium, Association of scientists and engineers of the naval sea system command. Washington, USA.
- [3] Faltisen, O. (2015). Hydrodynamics of High - Speed Marine Vehicles. Cambridge University Press.
- [4] Fridsma, G. (1969). A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats. Davison Lab. Report 1275.
- [5] Fridsma, G. (1971). A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats (Irregular Waves Part II). Davison Laboratory Report SIT-DL-71-1495.
- [6] Garne, K. (2004). Modelling of Planing Craft in wave. Tesis doctoral. KTH Royal Institute of Technology Sweden.
- [7] Garne, K. (2005). Improved Time-Domain Simulation of Planing Hulls in Waves by Correction of the Near-Transom. *International Shipbuilding Progress* 52(3), 201-230.
- [8] ISO. (2004). ISO 2631-5 - Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks. ISO.
- [9] ITTC. (1957). Concluding technical session. En 8th International Towing Test Conference. Madrid, Spain.
- [10] Ullman Dynamics. (2015). Practical Impact-Exposure Testing. Recuperado: <https://ullmandynamics.com/wp-content/uploads/2015/08/Practical-Impact-Exposure-Testing-ProBoat-142.pdf>.
- [11] Zarnick, E. (1978). A Nonlinear Mathematical Model of Motions of a Planing Boat in Regular Waves. Davison Laboratory, Technical report N° DTNRSDC-78/032.
- [12] Zarnick, E. (1979). A Nonlinear Mathematical Model of Motions of a Planing Boat in Irregular Waves. Davison Laboratory, Technical Report N° DTNRSDC-0867-01.
- [13] Coe, T. et al. (2009). A simplified 3-D human body-seat interaction model and its applications to the vibration isolation design of high-speed marine craft. *Ocean Engineering* 36, 732-746.

- [14] Olausson, K. y Garme, K. (2013). Simulation-Based Assessment of HSC Crew Exposure to Vibration and Shock. En Fast Conference 2013. Amsterdam, Holland.
- [15] Wice, A. (2015) Spatial Dynamic Modelling of High Speed Craft Suspension Seating. Tesis de maestria. Carleton University.
- [16] Townsend, N. et al. (2012). High speed marine craft motion mitigation using flexible hull design. *Ocean Engineering* 42, 126-134.
- [17] De Alwis, P. (2014). Methods for Shock and Vibration Evaluation Applied on Offshore Power Boats. Tesis de maestria. Royal Institute of Technology KTH.
- [18] Deyzen, A. (2008). A nonlinear mathematical model of motions of a planing monohull in head sea. En 6th International Conference on High-Performance Marine vehicles. Naples, Italy.
- [19] Savitsky, D. (1964). Hydrodynamic design of planning hulls. *Marine Technology* 1(1), 71-96.
- [20] Akers, R. (1999). Dynamic analysis of planning hulls in the vertical plane. En New England SNAME Meeting. Jersey City, USA.
- [21] Martins, M. (1978). Theoretical predictions of motions of high-speed planing boats in waves. *Journal of Ship Research* 22(3), 140-169.
- [22] De Luca, F. y Pensa, C. (2019). The Naples Systematic Series – Second part: Irregular waves, seakeeping in head sea. *Ocean Engineering* 194, 67-80.
- [23] Seo, J. et al. (2016). Model tests on resistance and seakeeping performance of wave-piercing high-speed vessel with spray rails. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 8(5), 442-455.

Análisis de la contribución de los aeropuertos regionales al desarrollo de la red doméstica de transporte aéreo. Caso de estudio: Colombia

Oscar Díaz Olariaga
Universidad Santo Tomás
Colombia

En el presente capítulo se analiza la contribución de los aeropuertos regionales en Colombia al desarrollo de la red doméstica de transporte aéreo y, con ello, a la conectividad de las regiones y su desarrollo social y económico. El crecimiento y la evolución de los aeropuertos regionales colombianos vienen soportados e impulsados por un conjunto de políticas públicas y de inversión, diseñadas exclusivamente para el sector aéreo e implementadas, casi de forma ininterrumpida, desde la liberalización de la industria del transporte aéreo en el país a principios de la década de 1990 y que aún siguen en desarrollo. Dicho esto, el presente trabajo analiza cómo, a través de las políticas públicas, la red de aeropuertos regionales pudo desarrollarse en dos décadas y media, y, luego, cómo estos aeropuertos impactaron positivamente en la conectividad y el desarrollo socioeconómico de los territorios. Todo esto mediante la presentación y el análisis de indicadores relacionados.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte aéreo desempeña un papel importante en la sociedad globalizada de hoy. Existe una creciente comprensión entre los gobiernos de todo el mundo de que la conectividad aérea es un activo que mejora la competitividad global de las ciudades, regiones y países. El crecimiento de la conectividad disminuye los costos de viaje para los consumidores y las empresas y facilita los contactos y el comercio global. Cada vez hay más pruebas de que el crecimiento de la conectividad aérea estimula la productividad, la inversión extranjera directa, el turismo, etc., en las diferentes regiones de un país [1]. Por esto, muchos gobiernos formulan políticas públicas en sus industrias de transporte aéreo para influir y mejorar los resultados de conectividad a nivel regional, a fin de lograr una cartera de conectividad que satisfaga mejor las necesidades de las sociedades locales [2].

En este contexto, y a nivel nacional, los aeropuertos regionales cobran una relevante importancia en al menos dos vertientes. En primer lugar, los aeropuertos regionales fortalecen la conectividad aérea doméstica y con esto la cohesión territorial de un país. Esto genera importantes beneficios socioeconómicos a las comunidades regionales al facilitar los desarrollos empresariales e industriales, incentivar la inversión extranjera directa interna y promover el comercio interregional de bienes y servicios [3]. En segundo lugar, los aeropuertos regionales dan un soporte vital a los denominados servicios aéreos esenciales, por ejemplo, para atención médica, servicios sociales, seguridad pública, educación, víveres de primera necesidad, etc., para aquellas comunidades remotas o aisladas donde ningún modo de transporte facilita la accesibilidad y, si lo hace, es con gran dificultad o limitadamente [4]. Finalmente, también existe una función social de los aeropuertos regionales, a saber, proveer una conectividad aérea adecuada a regiones periféricas y aisladas para hacerlas más atractivas para los habitantes actuales y futuros, y por lo tanto mantener las poblaciones de esas regiones, en otras palabras, evitar una despoblación masiva o escalonada [5].

En Colombia, país elegido como caso de estudio para la presente investigación, los aeropuertos regionales han tenido una función esencial en la conectividad regional. El país es el séptimo más grande del continente americano, cuenta con una extensión de 1,14 millones de km², con una región insular en el mar Caribe a 775 km de la costa atlántica y el 42,3% del territorio continental es selva amazónica. Con estas condiciones, el transporte aéreo es, en muchos casos, la única alternativa posible de accesibilidad a las regiones remotas, periféricas y aisladas. La importancia de los aeropuertos regionales se fortalece si a las características geográficas del país se suma una escasa cobertura de la red vial nacional y una inexistente red ferroviaria de transporte de pasajeros [6]. Por todas estas razones, el Gobierno colombiano, consciente de la importancia del transporte aéreo doméstico y de los aeropuertos regionales, viene implementando unas políticas públicas y de inversión desde hace un poco más de dos décadas con el objetivo de mejorar, ampliar y modernizar tecnológicamente las infraestructuras aeroportuarias en todas las regiones del país. Sin lugar a duda, la liberalización de la industria de la aviación en el país, a principios de la década de 1990, ayudó al progresivo desarrollo del transporte aéreo doméstico y de la red aeroportuaria [7]. Dicho esto, el presente capítulo analiza la contribución de los aeropuertos regionales a la conectividad y el desarrollo de los territorios en Colombia, a través de varios indicadores (aeronáuticos y socioeconómicos) y utilizando, como base fundamental de análisis, las políticas públicas aéreas.

2. MÉTODO

El presente capítulo es una revisión, por lo tanto, su enfoque y planteamiento, de carácter descriptivo, se desarrolla de la siguiente manera. En primer, en el Marco Conceptual, se introduce al lector en los conceptos básicos de los aeropuertos regionales, es decir qué son o cómo se definen y bajo qué parámetros o criterios. Esto es relevante ya que luego, en el caso de estudio, se debe saber seleccionar con un criterio coherente aquellos aeropuertos de la red colombiana que cumplan dicho criterio. Luego, dentro de esta misma sección, se describe a nivel conceptual el papel o función de los aeropuertos regionales en la conectividad y desarrollo territorial. Conceptualizar este aspecto es

necesario ya que es una de las principales razones de ser de los aeropuertos regionales. Finalmente, el Marco Conceptual se cierra describiendo la otra función fundamental de los aeropuertos regionales, el soporte a los servicios aéreos esenciales que, en países como Colombia, es prácticamente política de estado.

Paso seguido, se presenta el Caso de Estudio, cuyo desarrollo se divide en dos grandes sub secciones, por un lado, se aborda la política pública aeroportuaria en Colombia, origen y base del relevante desarrollo que ha presentado el transporte aéreo colombiano en las últimas tres décadas, y que como se verá en el transcurso del capítulo, ha contribuido al auge e importancia de la función de los aeropuertos regionales. Y en segundo orden, se citan las políticas públicas de conectividad aérea a regiones remotas, periféricas y aisladas en Colombia, políticas que implican directamente a los aeropuertos regionales en dichas relevantes funciones sociales.

Posteriormente, en la sección Resultados, se presentan los impactos de las políticas públicas aéreas en Colombia. esta sección se estructura en cuatro partes o sub secciones, a saber: descripción de la evolución de la red aeroportuaria colombiana, con énfasis en los aeropuertos regionales, base de la presente investigación; el desarrollo histórico del tráfico aéreo en el país; el comportamiento de la concentración de la red, conectividad y accesibilidad a las regiones, en donde se puede apreciar en detalle el importante papel de los aeropuertos regionales en Colombia; y finalmente, aunque no menos importante, el impacto económico y social en las regiones colombianas por parte del transporte aéreo. Finalmente, el trabajo de cierra con las oportunas conclusiones finales.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Conceptos básicos de aeropuertos regionales

En primer lugar, existen varias formas o propuestas semi-formales de clasificar o agrupar a los aeropuertos según ciertas características funcionales [8]. En términos de pasajeros y movimientos, los aeropuertos se pueden definir como: 1) primarios o principales, si el número de pasajeros anuales es superior a una cierta cifra; y 2) regional, cuando el volumen de pasajeros anuales es menor a dicha cifra, dentro de este grupo puede haber alguna subdivisión, por ejemplo, regionales grandes, medianos, pequeños, muy pequeños. La Organización de Aviación Civil Internacional [9] establece que un aeropuerto puede clasificarse según la densidad de tráfico del aeropuerto, como el número de movimientos por pista durante la hora pico.

Dependiendo de su función dentro de la red, un aeropuerto se puede clasificar como: *hub* o alimentador. Finalmente, de acuerdo con el tipo de rutas que se ofrecen y sus distancias asociadas, los aeropuertos se pueden clasificar como: 1) aeropuertos de primer nivel, con destinos intercontinentales e internacionales que cubren distancias superiores a 3.000 km; 2) aeropuertos de segundo nivel, con destinos nacionales e internacionales que cubren distancias iguales o inferiores a 3.000 km; y 3) aeropuertos de tercer nivel, con destinos nacionales que cubren distancias en el rango de 300–1.000 km.

En otro orden, existen varios intentos de definir aeropuerto regional; estos vinculan la noción de regional o no central con el hecho de que el área de influencia de un aeropuerto se encuentra fuera de una ciudad capital. En la Unión Europea no existe, al menos hasta la fecha, una definición formal de aeropuerto regional con el objetivo de desarrollar políticas públicas relacionadas. En los Estados Unidos, la Administración Federal de Aviación subdivide los aeropuertos con tráfico comercial en aeropuertos primarios y no primarios, dependiendo del número anual de pasajeros embarcados [10]. Y finalmente, un estudio reciente [11] considera que el área de captación o el tráfico anual de un aeropuerto no son indicadores válidos para determinar si un aeropuerto es regional o no, por esto, dicho estudio afirma que un aeropuerto debe considerarse regional si: 1) principalmente sirve rutas de corto y mediano alcance, y 2) principalmente sirve destinos punto a punto.

3.2 La función de los aeropuertos regionales en la conectividad y el desarrollo de los territorios

Los aeropuertos regionales son nodos de transporte esenciales que facilitan el buen funcionamiento del mercado interior de un país al conectar personas, productos y servicios; también permiten la actividad y el crecimiento económicos, expanden el horizonte de las rutas comerciales tradicionales y proporcionan un impulso significativo a las ciudades y regiones al aumentar la accesibilidad y mejorar la cohesión social y el desarrollo [12].

En muchas regiones al interior de los países, existen pocas alternativas eficientes o incluso viables al transporte aéreo, debido a una combinación de factores que incluyen la distancia, la baja densidad de población, las restricciones geográficas, la climatología adversa, etc. Muchas veces los aeropuertos en estas regiones son el único medio que facilita el acceso a servicios esenciales para dichas comunidades. También apoyan la integración económica y social, permitiendo que las empresas se conecten y que los ciudadanos viajen por trabajo. Los aeropuertos regionales y los servicios aéreos que facilitan son, por lo tanto, extremadamente relevantes cuando se observa el desarrollo local y la contención a una despoblación severa, es decir, evitan una emigración masiva o escalonada a las grandes ciudades [13].

Muchos gobiernos formulan políticas públicas de transporte aéreo para, entre otros, mejorar la conectividad entre sus territorios; sus argumentos son diversos, los más importantes son: 1) económicos, como el desarrollo productivo, la generación de empleo y riqueza, etc.; y 2) sociopolíticos, como la integración y cohesión territorial [1, 14]. En lo que se refiere al primer argumento, el económico, se estima que el transporte aéreo es un factor habilitante para un desarrollo económico más amplio en una región [15]. Un análisis de la bibliografía existente en la temática confirma que el transporte aéreo de pasajeros y el empleo en diferentes sectores industriales, en las regiones urbanas, están positivamente vinculados [16-23]. La razón de estas afirmaciones es la observación de que mejores servicios de transporte aéreo implican una mejor accesibilidad, lo cual alienta a las empresas a ubicarse en una región y estimula la expansión de los negocios existentes [24, 25].

Al parecer, esta mejora en la accesibilidad y la conectividad contribuyen a dar resultados positivos en un nivel económico general al mejorar los niveles de productividad, gracias a un mayor acceso a otros mercados y una mejor dinámica de movimiento de los trabajadores entre regiones [26-28]. Y, finalmente, algunas investigaciones afirman que el empleo en el sector de los servicios se deriva de la suposición de que la industria de servicios es más sensible al transporte aéreo de pasajeros que otros sectores de la economía [2, 29-33].

En definitiva, los aeropuertos de las regiones ahora están definiendo las economías de sus comunidades, es decir, son impulsores del desarrollo socioeconómico de los territorios. Los aeropuertos regionales se transforman en catalizadores para la regeneración económica y el crecimiento [34].

3.3 Aeropuertos regionales como soporte de los servicios aéreos esenciales

Dado el vínculo entre la conectividad y el crecimiento económico, los gestores públicos están interesados en mecanismos apropiados para promover eficazmente el transporte aéreo, no solo en los grandes centros económicos, sino también en áreas remotas, las cuales estarían excluidas en condiciones normales de mercado. A nivel mundial es fácil encontrar países con regiones o territorios hacia los cuales las rutas no son rentables para las líneas aéreas locales, principalmente, debido al bajo o casi nulo volumen de pasajeros regulares transportados, en otras palabras, baja o muy baja demanda, lo cual no facilita el desarrollo de conexiones de transporte aéreo adecuadas.

Sin embargo, debido a la importancia social, económica y hasta geopolítica de las comunidades remotas, ultra-periféricas o aisladas, muchos países formulan políticas públicas destinadas a proporcionar y garantizar la conectividad aérea a dichas regiones. Estas políticas conducen a lo que se conoce como servicios aéreos esenciales o también obligaciones de servicio público [35].

A nivel mundial, muchos países desarrollan políticas públicas para proporcionar conectividad aérea a regiones remotas, y esas políticas obedecen a las características y situación particulares del país. En general, dichas políticas públicas se pueden clasificar en cuatro grandes grupos bien diferenciados [36]: 1) políticas basadas en rutas; 2) políticas basadas en los pasajeros; (3) políticas basadas en la compañía aérea; y 4) políticas aeroportuarias. En todas estas políticas el aeropuerto regional, cualquiera sea su tipo o tamaño, es clave para dar soporte a los servicios aéreos esenciales.

4. CASO DE ESTUDIO: POLÍTICAS AÉREAS COLOMBIANAS

4.1 Política pública aeroportuaria

Desde mediados de la década de 1990, y en varias fases temporales denominadas generaciones, el sector público colombiano entregó en concesión varios aeropuertos del país, un total de 19 a la fecha, de los 46 que son propiedad del estado colombiano abiertos al tráfico comercial, con el fin de obtener una mejor administración, modernización, expansión, operación, explotación comercial y mantenimiento de las terminales aéreas (Figura 1) [37]. Conforme el objetivo planteado a las concesiones aeroportuarias, la empresa, la sociedad, el consorcio o el ente concesionario de los aeropuertos se desempeña únicamente como administrador y operador. Los aeropuertos concesionados son de tamaño grande, mediano y pequeño, en lo que se refiere a volumen anual de pasajeros gestionados, y están distribuidos en casi todo el país.

Paralelamente, la política de concesiones aeroportuarias vino acompañada de una importante política de inversión pública en los aeropuertos gestionados por el Estado, que no ha cesado desde hace dos décadas. En contraste, la inversión privada en aeropuertos ha evolucionado de acuerdo con las dinámicas propias de las concesiones, pasando de inexistente en 1996, inicio de las primeras concesiones, a un 20% como porcentaje del PIB de transporte aéreo en 2010 [38]. Entre 1993 y 2018, la inversión pública en infraestructura aeroportuaria fue de aproximadamente USD 1.728 millones, principalmente en aeropuertos medianos y pequeños; mientras que la inversión privada fue de USD 1,612 millones (periodo 1996-2015), y de USD 570 millones (periodo 2016-2018) [39], producida en las cuatro generaciones de concesiones aeroportuarias, que cubre todos los tipos de aeropuertos, grandes, medianos, pequeños y muy pequeños [39-41].

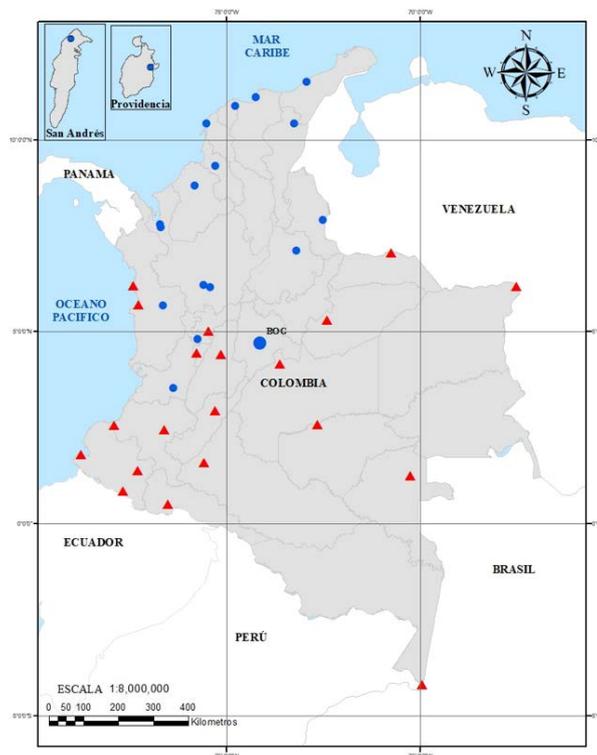


Figura 1. Aeropuertos en estudio. *Descripción:* círculo azul: aeropuertos con gobernanza privada; triángulo rojo: aeropuertos con gobernanza pública; BOG es el código IATA del principal aeropuerto del país (no participa en el estudio) [42]

4.2 Políticas de conectividad aérea para regiones remotas y aisladas

Colombia tiene una compleja geografía que dificulta la conectividad y la accesibilidad territorial vía terrestre, por ejemplo: 1) el país está atravesado de suroeste a noreste por tres cadenas montañosas de la cordillera de los Andes; 2) el país posee una región insular en el mar Caribe (el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina) a 775 km de la costa atlántica colombiana; y 3) el 42,3% del territorio continental corresponde a la selva amazónica (zona sureste del país). Sumado a esta situación geográfica, Colombia presenta una gran deficiencia en cobertura y capacidad de los sistemas de comunicación en los sistemas terrestre-vial y ferroviario, este último prácticamente inexistente [6]. En definitiva, todo esto conduce a que el transporte aéreo en Colombia sea vital y con una función más que relevante en la conectividad territorial.

Así, la política pública adoptada en Colombia para el acceso aéreo a regiones remotas y aisladas corresponde a la denominada política basada en compañía aérea. Gracias a esto, en la actualidad, los servicios aéreos esenciales en Colombia son prestados por el operador público SATENA, cuyo objetivo es prestar el servicio aéreo de pasajeros, correo y carga, proveer el transporte, en su prioridad, a las regiones menos desarrolladas del país y conectar vía aérea aquellas regiones adonde no llega ningún otro operador; de esta manera garantiza la conectividad e integración territorial [43]. Cabe mencionar que el operador público SATENA también opera rutas domésticas rentables, en directa competencia con operadores privados presentes en el mercado aéreo colombiano.

En otro orden, la autoridad aeronáutica de Colombia debe garantizar la conectividad aérea, por el operador aéreo público, a las denominadas zonas más afectas por el conflicto, municipios y comunidades remotas o periféricas que sufrieron un gran impacto social y humanitario durante el conflicto armado en el país, el cual duró cinco décadas y terminó con la firma del acuerdo de paz en 2016. Los servicios de conectividad aérea a esos municipios vulnerables se denominan rutas sociales, y se prestan por el operador aéreo público SATENA desde aeropuertos principales y secundarios. Asimismo, la cobertura de las rutas sociales va más allá de las zonas antes mencionadas; los criterios para identificar una comunidad beneficiaria de una ruta social son los siguientes [44]: 1) situación geográfica; 2) infraestructura; 3) orden público; 4) pobreza; 5) entorno de desarrollo; 6) comunidades vulnerables; 7) potencialidad turística; y 8) conexión regional.

4.3 Impacto de las políticas públicas aéreas

4.3.1 Estructura de la red de aeropuertos

La red aeroportuaria colombiana no ha cambiado en las últimas tres décadas, es decir no se han construido nuevos aeropuertos. Pero, como se mencionó, tanto las políticas de concesiones aeroportuarias como las de inversión pública contribuyeron a la ampliación y modernización tecnológica de casi todos los aeropuertos de la red, proceso que aún está en curso.

Para la presente investigación se escogió un grupo de 38 aeropuertos regionales, considerando como regional el criterio de ACI Europe [11] antes citado, es decir: de tamaño mediano-grande, mediano, pequeño y muy pequeño, de los cuales solo cuatro operan vuelos internacionales, pero el grueso de su tráfico aéreo es de carácter doméstico, y, finalmente, la mayoría de estos aeropuertos sirven destinos punto a punto de corto y mediano alcance. En la Figura 2 se puede apreciar la ubicación geográfica de todos los aeropuertos en estudio; se incluyó el principal aeropuerto del país, Bogotá-El Dorado (BOG), pero solo como información de contexto, ya que no participa en el estudio, puesto que no tiene el estatus de aeropuerto regional; todo lo contrario, es el tercer terminal aéreo de América Latina (por volumen de pasajeros transportados), estadísticas al 2019: 32,7 M Pax y 723.000 Tn carga aérea [42]. En conjunto, el grupo de aeropuertos representados en la Figura 2 (incluido Bogotá), gestiona el 99% del tráfico aéreo doméstico del país [42], lo que garantiza una cifra significativa de aeropuertos regionales para la investigación.

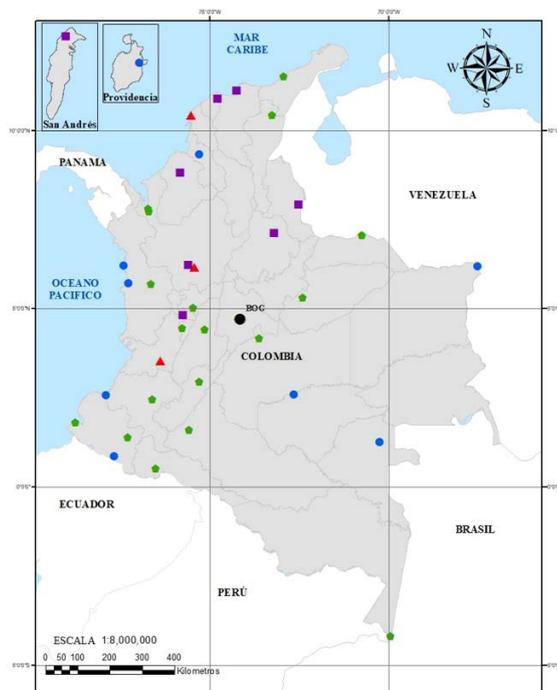


Figura 2. Aeropuertos con tráfico al 2019. Descripción: triángulo rojo: 4-8 millones Pax; cuadrado morado: 1-3 millones Pax; pentágono verde: 0,1-0,5 millones Pax; círculo azul: 0,03-0,1 millones Pax [42]

Colombia concentra todo su desarrollo poblacional, económico y productivo en la región central, oeste y norte del país [6]. Por esto, la red aeroportuaria, y sobre todo sus principales aeropuertos, se concentran también en dichas regiones; en definitiva, la geografía del sistema aeroportuario y su desarrollo coinciden y son coherentes con la geografía socioeconómica del país. Sin embargo, y como se aprecia en las Figuras 1 y 2, existen aeropuertos en regiones remotas, periféricas y aisladas en localizaciones diferentes a las antes mencionadas donde habitan comunidades medianas y pequeñas, razón por la cual se justifica allí la presencia de aeropuertos, mayoritariamente pequeños o muy pequeños.

4.3.2 Desarrollo del tráfico aéreo

En Colombia, el crecimiento del tráfico aéreo doméstico (pasajeros nacionales) en conjunto (todos los aeropuertos) fue del 926% en el periodo de 1992-2019 [42]. Ahora bien, como se puede apreciar en la Figura 3, los aeropuertos regionales han tenido diferentes ritmos de crecimiento, en muchos casos relevantes, independientemente del tamaño del aeropuerto, de su ubicación geográfica o de su estatus (central o remoto, periférico o aislado).

Un indicador muy utilizado en el transporte aéreo es el RPK (Revenue Passenger Kilometers), el cual considera la distancia que el pasajero recorre en su viaje. En el caso de Colombia el RPK doméstico del sistema aeroportuario se triplicó en la última década (Figura 4) [42]. Ahora bien, como la red nacional de aeropuertos no ha variado, tres décadas sin nuevos aeropuertos, el crecimiento del RPK se debe entonces a la incorporación, por parte de las líneas aéreas, de nuevos destinos y de una mayor oferta de sillas y frecuencias [42, 45].

4.3.3 Concentración de la red, conectividad y accesibilidad a las regiones

Una investigación reciente sobre el desarrollo en los últimos 25 años de la red de transporte aéreo en Colombia a nivel doméstico, y que utilizó un modelo derivado de la teoría de redes, concluyó que la red aeroportuaria colombiana tiene un grado débil de interconexión, así como una gran heterogeneidad [46]. Según los autores, uno de los más importantes generadores de dicha heterogeneidad es la enorme influencia que tiene el principal aeropuerto del país

situado en su capital, que al año 2019 gestiona el 40% del tráfico doméstico y el 74% del tráfico internacional de toda la red [42].

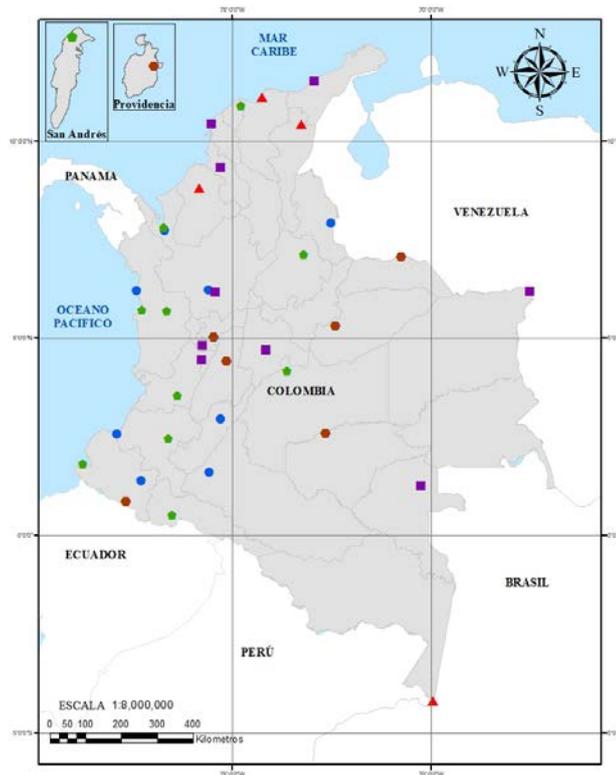


Figura 3. Crecimiento del tráfico (período 1992-2019). Descripción: triángulo rojo: 700-1000%; cuadrado morado: 400-700%; pentágono verde: 200-400%; círculo azul: 100-200%; hexágono marrón: <100% [42]

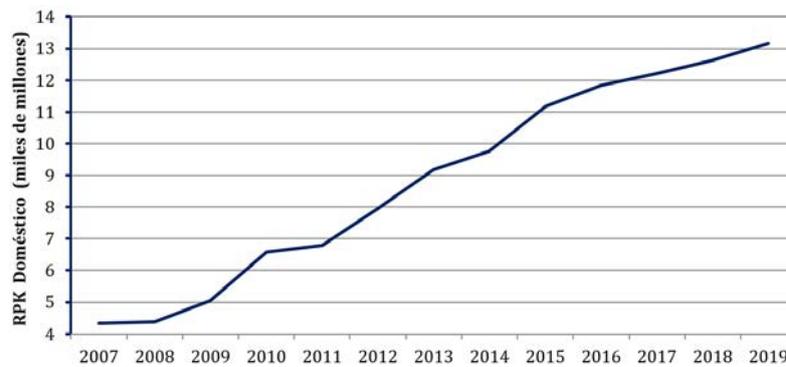


Figura 4. Desarrollo del RPK doméstico colombiano [42]

Para determinar el nivel de concentración de tráfico doméstico de la red aeroportuaria colombiana se calculó el Índice de Gini (GI). Para el inicio del periodo de estudio (1992), un año después del inicio de la liberalización del transporte aéreo en el país, el resultado fue $GI = 0,7474$; y para el final del periodo (2019) el resultado fue $GI = 0,8004$. El análisis de este indicador nos permite confirmar dos cosas: primero, el nivel de concentración es el habitual, y muy similar, al de otras regiones y países del mundo en los últimos años y década [47, 48]; y segundo, el aumento del nivel de concentración es similar con lo verificado en otros mercados de transporte aéreo a nivel mundial, en los cuales el periodo posterior a la liberalización de la industria de la aviación vino acompañado de un aumento de la concentración del tráfico aéreo, debido a la migración de una estructura punto-a-punto a una tipo *hub-and-spoke* [49-51].

Ahora, resulta de interés conocer cómo ha influido el incremento de la concentración en la red doméstica en el flujo de tráfico aéreo en los diferentes destinos regionales en estudio, muchos considerados de carácter remoto, periférico y aislado. Entonces, se calculó el indicador índice de viaje que identifica la relación entre pasajeros domésticos (llegadas y salidas) gestionado por el aeropuerto y la población de la ciudad o región en donde se encuentra el aeropuerto. Este indicador puede también ser considerado como uno de accesibilidad a servicios de transporte aéreo, según ICAO [52]. La Tabla 1 muestra el comportamiento de este indicador para el periodo de estudio (1992-2019) y para todos los aeropuertos analizados. Del comportamiento del indicador se derivan, al menos, dos conclusiones: en primer lugar, salvo en tres casos, el indicador creció en los aeropuertos analizados, y en algunos casos de forma relevante; y, en segundo lugar, el indicador creció en casi todos los destinos considerados remotos, periféricos y aislados.

Tabla 1. Desarrollo del indicador índice de viaje en los destinos regionales en estudio. En tipografía diferente los destinos considerados remotos, periféricos y aislados

Ciudad	Índice 1992	Índice 2019	Ciudad	Índice 1992	Índice 2019
Rionegro (MDE)	15,6	52,0	Riohacha (RCH)	0,5	1,3
Cartagena (CTG)	0,9	4,6	Manizales (MZL)	0,4	0,5
Cali (CLO)	0,8	2,1	Carepa (APO)	2,0	4,2
Barranquilla (BAQ)	0,5	2,0	Ibague (IBE)	0,2	0,3
San Andrés (ADZ)	11,3	41,1	Barrancabermeja (EJA)	0,3	0,7
Santa Marta (SMR)	0,7	4,3	Tumaco (TCO)	0,4	0,6
Bucaramanga (BGA)	0,8	3,0	Popayan (PPN)	0,1	0,4
Pereira (PEI)	0,9	3,6	Arauca (AUC)	2,4	1,4
Medellin (EOH)	0,3	0,4	Florencia (FLA)	0,5	0,7
Cucuta (CUC)	0,9	1,4	Puerto Asís (PUU)	0,6	1,7
Monteria (MTR)	0,3	2,0	Corozal (CZU)	0,3	1,3
Villavicencio (VVC)	0,4	0,9	Bahía Solano (BSC)	2,9	7,1
Valledupar (VUP)	0,2	0,9	Providencia (PVA)	14,3	10,9
Armenia (AXM)	0,3	1,4	Mitú (MVP)	0,5	1,6
Quibdo (UIB)	0,6	2,7	Puerto Carreño (PCR)	0,8	2,5
Pasto (PSO)	0,4	0,8	Nuquí (NQU)	1,3	2,5
Leticia (LET)	1,2	6,7	San José del Guaviare (SJE)	0,5	0,7
Neiva (NVA)	0,4	0,8	Ipiales (IPI)	0,3	0,3
El Yopal (EYP)	3,3	1,7	Guapi (GPI)	0,6	1,3

En otro orden, ICAO [53] estableció una métrica para cuantificar la accesibilidad del transporte aéreo en un país y así poder comparar con otros países y con la media mundial. Esta métrica utiliza la distancia como concepto, al considerar que un habitante tiene acceso al transporte aéreo internacional si vive dentro de un radio de 100 km de un aeródromo que ofrece vuelos programados internacionales directos o indirectos. Entonces, para 2019, en Colombia el 54% de la población total del país vive dentro del rango de 100 km de cobertura geográfica de un aeropuerto con oferta de vuelos internacionales. Esta cifra es ligeramente superior a la media mundial, de 51,25%, según ICAO [53].

En lo que se refiere al desarrollo de rutas aéreas, en la Figura 5 se presentan las conexiones directas (punto a punto) y de vuelos programados entre todos los aeropuertos regionales en estudio y a partir de 10.000 Pax/año. Ahora bien, si se suman todas las conexiones directas del principal aeropuerto del país (que no participa en el estudio), que conecta con casi todos los destinos interiores, al año 2019 existen 170 conexiones directas domésticas, las cuales mueven pasajeros regulares, en vuelos programados, entre todos los aeropuertos de la red [42].

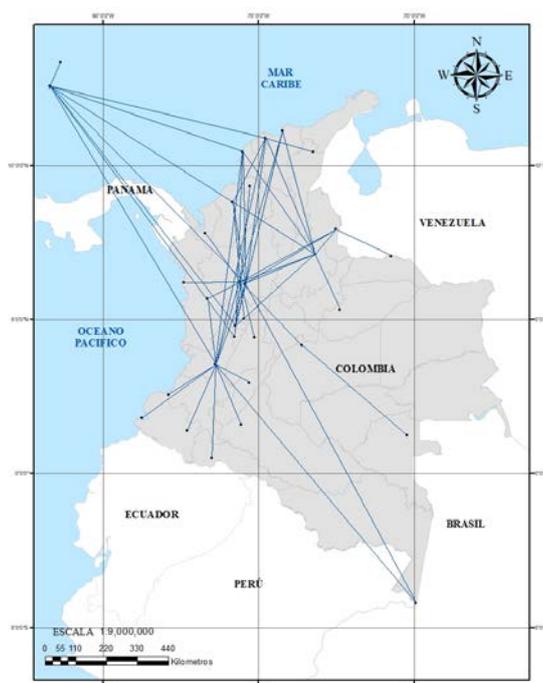


Figura 5. Mapa de rutas nacionales, conexiones punto a punto de los aeropuertos regionales (desde 10.000 Pax / año) [42]

Finalmente, mencionar que una investigación reciente, en donde se analizó el comportamiento del tráfico de pasajeros domésticos en Colombia utilizando un modelo gravitacional, concluyó que debido a factores tales como la compleja geografía del país, la ubicación de los aeropuertos, el poder adquisitivo de los habitantes y la falta de alternativas de movilidad (otros modos de transporte), el transporte aéreo es un factor determinante en la conectividad interior, y donde empieza a ser muy competitivo, con respecto al modo vial o terrestre de transporte, para distancias superiores a los 200 km [54].

4.3.4 Impacto económico y social en las regiones

En lo que se refiere a los efectos sociales que genera el transporte aéreo en las regiones, donde se localizan los aeropuertos analizados, la presente investigación determinó los siguientes indicadores: en el periodo de estudio (1992-2019) hubo un crecimiento medio anual del tráfico aéreo (promedio entre todas las regiones bajo estudio) del 12,03%, el cual vino acompañado con un crecimiento medio anual del 2,08% de la población (promedio entre todas las regiones) y de un 0,28% de crecimiento medio anual del empleo (promedio entre todas las regiones). Estos indicadores son proporcionalmente similares a los encontrados por Tveter [5] y Blonigen y Cristea [55], cuyas investigaciones tienen enfoques parecidos a la presente (aeropuertos regionales, análisis en contexto de liberalización, periodo temporal de estudio, etc.) en diferentes regiones geográficas.

En otro orden, el PIB regional por pasajero regional o doméstico transportado se cuadruplicó en las últimas dos décadas y media. En la Figura 6 se puede apreciar este comportamiento; las cifras de PIB regional son la suma, para cada año, de todos los PIB de las regiones estudiadas, igual con la cifra de los pasajeros domésticos gestionados por los aeropuertos regionales en estudio.

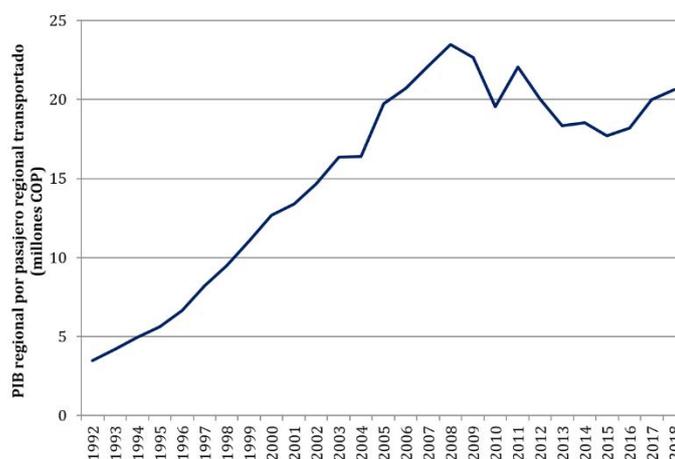


Figura 5. PIB regional por pasajero regional transportado. PIB en precios corrientes (COP) [42, 56]

5. CONCLUSIONES

Como muestran los indicadores presentados y analizados, los aeropuertos regionales en Colombia, muchos de ellos pequeños o muy pequeños y varios situados en regiones remotas, periféricas y aisladas, han tenido un papel fundamental en el desarrollo de la red doméstica de transporte aéreo, sobre todo en lo que se refiere a la conectividad territorial vía aérea, y al desarrollo de las regiones donde se localizan los aeropuertos.

Sin lugar a duda, la liberalización del sector del transporte aéreo en Colombia, que inició a principios de la década de 1990, y el continuo desarrollo de políticas públicas para el sector, como también las políticas de inversión pública y privada en infraestructuras aeroportuarias que implicaron a casi la totalidad de la red de aeropuertos, contribuyeron a la progresiva evolución de los aeropuertos regionales y, con esto, en la estructura de la red nacional de aeropuertos.

Finalmente, vale mencionar que esta investigación intentó cubrir un enorme vacío en la literatura científica, en lo que refiere a la función de los aeropuertos regionales en el subcontinente latinoamericano. En América Latina, muchos países tienen dimensiones continentales y con territorios remotos, periféricos y completamente aislados de las grandes ciudades, o, incluso, de las masas continentales de los países. En este subcontinente, el papel e importancia de los aeropuertos regionales en la conectividad y cohesión territorial y en el desarrollo socioeconómico de las regiones irá en aumento, con gran probabilidad, lo cual invita a continuar con la presente línea de investigación.

REFERENCIAS

- [1] Burghouwt, G. (2017). Influencing Air Connectivity Outcomes. Roundtable on Capacity building through efficient use of existing airport infrastructure. Querétaro.
- [2] van de Vijver, E. et al. (2014). Filling some black holes: Modeling the connection between urbanization, infrastructure, and global service intensity. *The Professional Geographer* 66(1), 82-91.
- [3] OECD/ITF (2018). Defining, Measuring and Improving Air Connectivity. OECD/ITF.
- [4] Fageda, X. et al. (2019). Air transport connectivity of remote regions: the impacts of public policies. *Regional Studies* 53(8), 1161-1169.
- [5] Tveter, E. (2017). The effect of airports on regional development: Evidence from the construction of regional airports in Norway. *Research in Transportation Economics* 63, 50-58.
- [6] Díaz, O. y Carvajal, A. (2016). Efectos de la liberalización en la geografía del transporte aéreo en Colombia. *Cuadernos Geográficos* 55(2), 344-364.

- [7] Díaz, O. (2017). Políticas de privatización de aeropuertos. El caso de Colombia. *Documentos y Aportes en Administración Pública y Gestión Estatal* 29, 7-35.
- [8] Postorino, M. (2010). *Development of Regional Airports: Theoretical Analyses and Case Studies*. WIT Press.
- [9] ICAO. (2018). Annex 14. Aerodromes, Volume 1 - Aerodromes Design and Operations. ICAO.
- [10] FAA (2020). Airport Categories. Recuperado: https://www.faa.gov/airports/planning_capacity/passenger_allcargo_stats/categories/.
- [11] ACI Europe. (2017). European regional airports, connecting people, places & products. ACI Europe.
- [12] Baker, D. y Donnet, T. (2012). Regional and remote airports under stress in Australia. *Research in Transportation Business & Management* 4, 37-43.
- [13] Redondi, R., Malighetti, P. y Paleari, S. (2013). European connectivity: the role played by small airports. *Journal of Transport Geography* 29, 86-94.
- [14] Burghouwt, G. y Redondi, R. (2013). Connectivity in air transport networks: an assessment of models and applications. *Journal of Transport Economics and Policy* 47(1), 35-53.
- [15] van de Vijver, E., Derudder, B. y Witlox, F. (2016). Air passenger transport and regional development: Cause and effect in Europe. *Promet – Traffic & Transportation* 28(2), 143-154.
- [16] Goetz, A. (1992). Air passenger transportation and growth in the U.S. urban system. *Growth and Change* 23, 218-242.
- [17] Liu, Z., Debbage, K. y Blackburn, B. (2006). Locational determinants of major US air passenger markets by metropolitan area. *Journal of Air Transport Management* 12, 331-341.
- [18] Alkaabi, K. y Debbage, K. (2007). Air passenger demand and skilled labor markets by US metropolitan area. *Journal of Air Transport Management* 13(3), 121-130.
- [19] Button, K. y Taylor, S. (2000). International air transportation and economic development. *Journal of Air Transport Management*, 6(4), 209-222.
- [20] Neal, Z. (2012). Creative employment and jet set cities: disentangling causal effects. *Urban Studies* 49, 2693-2709.
- [21] Green, R. (2007). Airports and economic development. *Real Estate Economics* 35(1), 91-112.
- [22] Brueckner, J. (2003). Air traffic and urban economic development. *Urban Studies* 40(8), 1455-1469.
- [23] Ivy, R., Fik, T. y Malecki, E. (1995). Changes in air service connectivity and employment. *Environment and Planning* 27, 165-179.
- [24] Cooper, A. y Smith, P. (2005). The economic catalytic effects of air transport in Europe. Final report EEC/SEE/2005/004. Eurocontrol.
- [25] Zak, D. y Getzner, M. (2014). Economic effects of airports in Central Europe: A critical review of empirical studies and their methodological assumptions. *Advances in Economics and Business* 2(2), 100-111.
- [26] Perovic, J. (2013). The economic benefits of aviation and performance in the travel & tourism competitiveness index. En Blanke, J. y Chiesa, T. (Eds.), *The travel & tourism competitiveness report. Reducing barriers to economic growth and job creation* (pp. 57-61). World Economic Forum.
- [27] Mukkala, K. y Tervo, H. (2013). Regional airports and regional growth in Europe: which way does the causality run? *Environment and Planning* 45, 1508-1520.
- [28] Button, K. et al. (1999). High-technology employment and hub airports. *Journal of Air Transport Management* 5(1), 53-59.
- [29] Percoco, M. (2010). Airport activity and local development: Evidence from Italy. *Urban Studies* 47(11), 2427-2443.
- [30] Debbage, K. (1999). Air transportation and urban-economic restructuring: Competitive advantage in the US Carolinas. *Journal of Air Transport Management* 5, 211-221.
- [31] Bel, G. y Fageda, X. (2008). Getting there fast: Globalization, intercontinental flights and location of headquarters. *Journal of Economic Geography* 8(4), 471-495.
- [32] Denstadli, J. (2004). The impact of videoconferences on business travel: The Norwegian experience. *Journal of Air Transport Management* 10(6), 371-376.
- [33] Faulconbridge, J. et al. (2009). Corporate ecologies of business travel in professional service firms: Working towards a research agenda. *European Urban and Regional Studies* 16, 295-308.
- [34] OECD/ITF. (2018b). *Government Support Measures for Domestic Air Connectivity*. OECD/ITF.
- [35] BID. (2018). *Conectividad aérea en regiones remotas*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- [36] Fageda, X. et al. (2018). Air connectivity in remote regions: A comprehensive review of existing transport policies worldwide. *Journal of Air Transport Management* 66, 65-75.
- [37] Pulido, L. y Díaz, O. (2019). Evaluación de la eficiencia en aeropuertos privatizados. *URBE – Revista Brasileira de Gestão Urbana* 11, e20180210.
- [38] Díaz, O. (2016). Análisis de la evolución de las políticas públicas y de regulación en la industria aeroportuaria en Colombia. *Documentos y Aportes en Administración Pública y Gestión Estatal* 26, 7-42.
- [39] ANI. (2020). *Aeropuertos*. Recuperado: <https://www.ani.gov.co/aeropuertos2>.
- [40] MinTransporte. (2018). *Transporte en cifras*. Ministerio de Transporte.
- [41] Fedesarrollo. (2016). *Competitividad en el transporte aéreo en Colombia*. Fedesarrollo.
- [42] Aerocivil. (2020). *Estadísticas*. Recuperado: <http://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas>.
- [43] Aerocivil. (2016). Resolución 3442. Aerocivil, Gobierno de Colombia.
- [44] DNP. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022*. Dirección Nacional de Planeación.
- [45] Tascón, D. y Díaz Olariaga, O. (2020). Behavior of air passenger demand in a liberalized market. *Transport and Telecommunication* 21(1), 1-14.
- [46] Zea, J., Díaz, O. y Tascón, D. (2019). Mutual influence on air transport routes network in the context of a liberalized aviation market. The case of Colombia. En VII International Congress of the Iberoamerican Air Transportation Research Society. Covilha, Portugal. Berster, P., Gelhausen, M. y Wilken, D. (2015). Constrained and underutilised airports: Two sides of a coin. En 19th ATRS World Conference. Singapore.
- [47] Huber, H. (2009). Comparing spatial concentration and assessing relative market structure in air traffic. *Journal of Air Transport Management* 15, 184-194.
- [48] Zhu, Z. et al. (2019). Measuring air connectivity between China and Australia. *Journal of Transport Geography* 74, 359-370.

- [49] Pacheco, R., Braga, M. y Fernandes, E. (2015). Spatial concentration and connectivity of international passenger traffic at Brazilian airports. *Journal of Air Transport Management* 46, 49-55.
- [50] Papatheodorou, A. y Arvanitis, P. (2009). Spatial evolution of airport traffic and air transport liberalisation: The case of Greece. *Journal of Transport Geography* 17, 402–412.
- [51] ICAO. (2017). Conceptualización de conectividad y desarrollo de una métrica global sobre conectividad aérea. AN&FS/4-NI/04.
- [52] ICAO. (2020). Air Transport Accessibility. Recuperado: <https://www.icao.int/safety/iStars/Pages/Air-Transport-Accessibility.aspx>.
- [53] Díaz, O. et al. (2018). Gravitational analysis of the air transport network. Application to the case of Colombia. *Transportation Research Procedia* 33, 51-58.
- [54] Blonigen, B. y Cristea, A. (2015). Air service and urban growth: Evidence from a Quasi-natural policy experiment. *Journal of Urban Economics* 86, 128-146.
- [55] DANE. (2020). Estadísticas. Recuperado: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema>.

Caracterización fisicoquímica de gilsonita y evaluación de su uso en aplicaciones para infraestructura vial

Denier Yela Jaramillo
Gloria Restrepo
Universidad de Antioquia
Colombia

En este trabajo se realiza la caracterización fisicoquímica del mineral gilsonita y una evaluación preliminar de sus potenciales usos para el desarrollo de nuevos materiales para aplicaciones en infraestructura vial. Se realizó la caracterización y evaluación de los materiales y las mezclas empleando diversos ensayos analíticos e instrumentales como dilución en n-heptano, fraccionamiento SARA, análisis elemental, espectroscopía infrarroja, espectroscopía de fluorescencia de Rayos X, análisis termogravimétrico, punto de ablandamiento, punto de inflamación y penetración. Los resultados indican que la gilsonita por sí misma no presenta características adecuadas para aplicaciones en ingeniería vial y su uso en mezclas asfálticas resulta limitado ya que es pobre en la fracción malténica y muy rica en la asfáltica. Mediante un diseño preliminar Marshall se evaluó el desempeño de un lodo asfáltico que pueda ser usado como ligante bituminoso, encontrándose resultados de flujo muy cercanos al límite permitido por la normativa colombiana y valores de estabilidad aceptables. No obstante, es necesario mejorar los valores de flujo para que la relación estabilidad/flujo sea admisible y garantizar que se obtengan valores volumétricos óptimos.

1. INTRODUCCIÓN

Un asfalto natural es una mezcla de hidrocarburos de alto peso molecular de naturaleza bituminosa, que se puede encontrar en estratos que comprendan desde unos cuantos centímetros a decenas de metros de espesor; estos minerales afloran a la superficie terrestre en forma líquida y puede usarse en estado puro o en combinación con agregados. Los depósitos presentes en rocas sedimentarias o metasedimentarias se solidifican debido a diferentes procesos de exposición al calor, presión y oxidación [1-3]. Las asfaltitas presentes en el asfalto natural son hidrocarburos de peso molecular elevado, cuyos principales componentes son los asfaltenos [4]. Se utilizan como refuerzo en asfaltos para mejorar el rendimiento y la estabilidad de la mezcla asfáltica, disminuyendo la susceptibilidad térmica y los efectos negativos del agua [5]. Las asfaltitas se clasifican en: Gilsonita, Grahamita y Glance Pitch. La Gilsonita y Grahamita difieren básicamente en su gravedad específica y temperatura de ablandamiento. Los principales yacimientos de Gilsonita se encuentran a lo largo de la frontera entre Colorado y Utah (U.S), la de tipo Glance Pitch en Barbados y Colombia; y la Grahamita en Cuba y México [4].

La gilsonita es una mezcla compleja de hidrocarburos que puede ser fácilmente emulsionado en agua, cuya principal aplicación es la estabilización de cortes [5, 6]. Los principales depósitos o vetas de asfalto natural en Colombia se encuentran en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Caquetá, Cauca, Chocó, Cundinamarca, Norte de Santander, Meta y Tolima [3, 7]. En los departamentos de Boyacá y Santander se ubican 2 títulos mineros para la explotación de gilsonita dura y blanda, respectivamente. En Boyacá el recurso medido de gilsonita dura equivale a 800000 ton; mientras que en Santander la gilsonita blanda alcanza las 1100000 ton [8]. En países como Irán existen diversas minas de gilsonita: en las provincias de Kermanshah, Ilam y Lorestan hay inventarios de gilsonita por 3.193.000, 256.000 y 6.000 toneladas, respectivamente [9].

Dado que la gilsonita es un material que tiene su origen en fuentes naturales, es de esperar que su composición química sea variable. Industrialmente la gilsonita tiene un amplio espectro de aplicaciones, de las cuales se destacan: fundición, asfalto, pigmentos, tintas y pinturas, petroquímica y gas [10, 11]. En Argentina, las asfaltitas han sido empleadas como combustible sólido, uso que ha disminuido a medida que se ha reemplazado por combustibles derivados del petróleo líquido [12]. En Colombia se han realizado varias aplicaciones de este tipo de material asfáltico para el mejoramiento de infraestructura vial [7, 13].

Los hidrocarburos de naturaleza asfáltica se pueden agrupar en cuatro fracciones distintivas: saturados, asfaltenos, resinas y aromáticos, que se determinan mediante el ensayo SARA. que comprende un fraccionamiento de dichas fases, seguido de una cuantificación de cada fracción obtenida que puede ser por cromatografía líquida en columna u otras técnicas analíticas e instrumentales como resonancia nuclear magnética (NMR). El índice de inestabilidad coloidal (IC) que relaciona los constituyentes floculados (saturados y asfaltenos) respecto a los dispersos (aromáticos y resinas), es una magnitud útil para conocer el desempeño de un ligante asfáltico en pavimento una vez determinadas sus fracciones [14]. Cuando el IC es mayor a 0,9 se espera que el ligante sea muy inestable y por tanto no apto para su uso en pavimentos flexibles [14, 15].

En un estudio realizado mediante Resonancia Magnética Nuclear se determinaron las fracciones masa que se muestran en la Tabla 1, para una muestra específica de gilsonita [15]. Para esta muestra el IC = 4,34 es mucho mayor a 0,9 y, por tanto, este material no resulta adecuado para su uso en infraestructura vial. Por otra parte, la gilsonita en condiciones ambientales presenta penetración cero [1], indicando que es un material duro pero frágil, es decir, se puede reducir de tamaño sin contemplar grandes cantidades de energía. Este aspecto ha hecho que gilsonita se use en polvo como aditivo para pinturas o tintas oscuras [15, 16].

Tabla 1. Fraccionamiento SARA de una muestra de gilsonita [15]

Componente	Fracción en masa (%)
Saturados	1,60
Asfaltenos	79,70
Resinas	18,70
Aromáticos	0,00

La composición en porcentaje atómico de la gilsonita varía en función del estrato del que proviene (ver Tabla 2). Este comportamiento implica que las relaciones atómicas también sean diferentes, lo que genera la existencia de los tipos de gilsonita mencionados.

Tabla 2. Composición química de la gilsonita en diferentes países

Elemento	País de origen			
	Colombia	Estados Unidos	Irán	No especificado
Carbono	75,20	84,36	78,70	78,80
Hidrógeno	7,00	10,05	8,00	8,50
Nitrógeno	1,50	3,25	1,00	1,00
Azufre	1,50	0,27	7,24	4,00
Oxígeno	8,40	1,36	1,70	1,90
Otros	6,40	0,71	3,36	5,80
Fuente	(27)	(15)	(9)	(2)

La utilización de gilsonita en infraestructura vial ha tenido sus mayores aplicaciones como modificante de asfaltos. En un estudio llevado a cabo con gilsonita granular se realizaron una serie de experimentos para modificar un asfalto base con un PG 52-28 (PG: grado de desempeño). Se emplearon dosificaciones de gilsonita de 0, 3, 6, 9 y 12% en el asfalto, obteniéndose que el rango alto de temperatura del PG estuvo entre 52°C (0%) hasta 70°C (12%); mientras que el rango bajo estuvo entre -28°C (0%) hasta -22 (12%). Estos resultados indican que la adición de gilsonita alteró el PG de tal manera que dicho asfalto modificado podría ser usado en pavimentos en un rango de temperaturas entre 70°C y -22°C. Es decir, aumentó la resistencia al ahuecamiento pero disminuyó la resistencia a la fatiga [16].

En Colombia desde 1997 ya se hacían acercamientos al uso de las asfaltitas como modificadoras de asfalto [17]. En un estudio en el cual se utilizó una gilsonita colombiana para obtener una mezcla asfáltica tipo MDC-2 mediante la modificación por vía húmeda asfaltos tipo CA 80-100 (PG 58-22) y CA 60-70 (PG 64-22) se pretendía establecer el efecto en la resistencia mecánica empleando el método Marshall. Se encontró que la adición de gilsonita da un comportamiento más rígido a la mezcla; que a bajas temperaturas se presenta un desempeño más frágil y que los valores de estabilidad y flujo Marshall fueron mayores en las mezclas modificadas que en las convencionales. El mismo comportamiento se observó en los valores de módulo resiliente que aumentaron a medida que la temperatura de ensayo era mayor. Se pudo concluir que la modificación de asfaltos colombianos con gilsonita presenta alta potencialidad para regiones de clima cálido [18].

En otra investigación se realizaron experimentos para modificar un asfalto colombiano CA 60-70 (PG 64-22) con gilsonita proveniente de la región del Cesar, Colombia y elaborar tres tipos de mezclas asfálticas MDC-1, MDC-2 y MDC-3. Para este caso se adicionó la gilsonita por vía seca; es decir, adicionándola directamente al agregado pétreo a alta temperatura. Los resultados indicaron incrementos de 34,9%, 44,1% y 20,4% en la estabilidad cuando las mezclas asfálticas MDC-1, MDC-2 y MDC-3, respectivamente, fueron dosificadas con el 10% de gilsonita. De igual manera los vacíos con aire aumentaron de 5,99% a 7,93% para la MDC-1, 5,00% a 6,66% para la MDC-2 y de 4,08% a 4,94% para la MDC-3. Se concluye que la gilsonita como modificador de asfalto resulta conveniente para mejorar el desempeño frente a altas temperaturas de servicio; sin embargo, a bajas temperaturas podrían presentarse fenómenos de fragilización por fatiga [3].

Shisong y col. modificaron asfalto grado de penetración 80-100 con 30% de gilsonita y caucho estireno butadieno (SBR). Inicialmente el asfalto con gilsonita disminuye sus valores de penetración y ductilidad, al mismo tiempo que aumentan el punto de ablandamiento y viscosidad. Con la adición de SBR se incrementa la penetración, punto de ablandamiento y ductilidad del asfalto modificado con gilsonita de manera considerable. Para dosificaciones en peso de SBR de 2,50%, 5,00%, 7,50%, 10,00% y 12,50% se obtuvieron aumentos de 17,50%, 20,50%, 25,10%, 26,30% y 28,50% en grado de penetración, así como una disminución de 5,00%, 10,50%, 11,70%, 13,50% y 16,90% en el punto de ablandamiento y un 21,80%, 29,70%, 95,30%, 117,20% y 137,50% en ductilidad, respectivamente [1]. Resultados similares se obtuvieron en el trabajo de Yasar [19]. En cuanto a parámetros reológicos se encontró que el asfalto modificado con gilsonita aumenta dramáticamente el módulo de almacenamiento G' y el módulo de pérdida G'' a medida que se aumenta la frecuencia de ensayo; mientras que, los modificados con gilsonita/SBR dependen más del contenido del polímero a bajas frecuencias.

Es decir, las propiedades viscoelásticas de los asfaltos con gilsonita/SBR son más sensibles a la frecuencia de carga que los modificados sólo con gilsonita. Los autores apuntan a que dicho comportamiento obedece a la buena interacción entre los componentes saturados y aromáticos del asfalto con la gilsonita. Respecto a la temperatura, el

módulo de almacenamiento G' cae en mayor medida que el de pérdida G'' , lo cual indica que el comportamiento viscoso es dominante en los asfaltos y es consistente con el desempeño de asfaltos a medida que aumenta la temperatura. Con la adición de gilsonita ambos módulos aumentan; lo que implica el aumento de la viscosidad y la mejora de propiedades elásticas del asfalto. Adicionalmente en el estudio se realizó un ensayo de reómetro de viga de flexión (BBR) para analizar el desempeño a bajas temperaturas; encontrado que entre el asfalto con gilsonita y el modificado con gilsonita/SBR disminuyó la rigidez del asfalto en 139 MPa aproximadamente y aumentó el valor m de 0,26 a 0,35 a -6°C . Sin embargo, a -12°C no lograron determinar las bondades de la adición del SBR al asfalto modificado con gilsonita [1]. Una investigación similar en la que modifican un asfalto con gilsonita, ácido poli-fosfórico y Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) en [20].

Del análisis en el estado del arte tanto a nivel nacional como internacional, se observa que en relación a las aplicaciones en infraestructura vial la principal potencialidad de la gilsonita es como material modificante de asfaltos. En las investigaciones mencionadas, particularmente las colombianas, no se presenta una caracterización completa de la gilsonita usada en estos estudios. De otra parte, dado el espectro de aplicaciones que tiene este material resulta conveniente y de gran interés establecer escenarios robustos de investigación que conduzcan al desarrollo de formulaciones de productos de naturaleza bituminosa a base de gilsonita.

2. MÉTODO

El objetivo de esta contribución es presentar resultados de la caracterización fisicoquímica detallada de una gilsonita colombiana para establecer y proponer potenciales usos en el área de infraestructura vial, es decir, estimar las principales características fisicoquímicas de este material. Por otra parte, se realizó la mezcla de gilsonita con residuos industriales para la formulación de un lodo asfáltico que pueda ser usado como ligante asfáltico. Se preparó un diseño experimental preliminar de mezcla asfáltica para análisis de flujo y estabilidad Marshall.

2.1 Materiales

Gilsonita colombiana proveniente del departamento de Santander con un tamaño nominal de 12 a 15 cm. Este material se somete a un proceso de disminución de tamaño para lograr un polvo fino (ver Figura 1). Para la formulación del lodo asfáltico se utilizaron 4 aditivos de diferente naturaleza: residuos de aceite mineral, aceite vegetal, un solvente derivado de petróleo y una resina comercial.

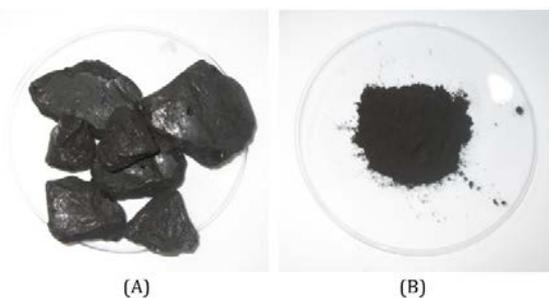


Figura 1. Gilsonita en masa (A), gilsonita en polvo luego de reducción de tamaño (B)

2.2 Caracterización fisicoquímica y composicional

- *Dilución en n-heptano.* Para la determinación de la fracción asfáltica y malténica se llevó a cabo el proceso de dilución y digestión en n-heptano por un periodo de 3 h a 100°C y 600 rpm, siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM D3279. El retenido en el papel filtro se considera como los asfaltenos; mientras que el pasante los maltenos. El análisis se llevó a cabo por triplicado.
- *Fraccionamiento SARA (Saturados, Asfaltenos, Resinas y Aromáticos).* Para el fraccionamiento SARA se siguió el procedimiento descrito en ASTM D4124-01 método B, consistente en la separación de las tres fases de la fracción malténica por cromatografía líquida en columna. La fase estacionaria es alúmina calcinada a 413°C durante un periodo de 16 h, mientras que la móvil consiste en diferentes solventes que se van adicionando según la naturaleza química de la fracción que se va a separar. En este caso y en este orden: n-heptano para los saturados, tolueno y una mezcla de metanol/tolueno (50/50) para los componentes aromáticos y tricloroetileno para las resinas.
- *Análisis elemental.* Este análisis se realizó por triplicado en un equipo CHNSO marca LECO modelo Truspec micro, siguiendo la norma ASTM D-5373-08. El análisis de CHN se realizó a 1050°C en un ambiente de helio; mientras que para azufre la temperatura fue de 1350°C en un ambiente de oxígeno. Para determinar el porcentaje de oxígeno se llevó a cabo el balance de masa con los valores de CHNS, humedad y ceniza. La cantidad de humedad y cenizas en la gilsonita se estimó según los procedimientos descritos en la normativa INVIAS, INV E 704 e INV E 705 respectivamente.

- *Análisis Espectroscópico.* Para complementar la caracterización composicional de la gilsonita, se empleó Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier FTIR y Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X, XRF. El análisis por FTIR se llevó a cabo en un equipo IR Prestige-21 /FTIR 8400S y el análisis XRF se realizó por triplicado empleando un equipo TestAll Geo. Duración individual: 120 segundos.
- *Punto de ablandamiento.* Debido a que la gilsonita es un material termosensible no presenta un punto de fusión definido y al valor de temperatura en que fluye se le conoce como punto de ablandamiento. Para determinarlo se sigue el método de bola y anillo descrito en la norma ASTM D36/D36M – 14.
- *Punto de ignición.* Para determinar el punto de ignición se utilizó la copa abierta Cleveland y los procedimientos descritos en la norma ASTM D92. La temperatura en la cual la llama de ensayo pasa por encima de la muestra y genera una pequeña llama repentina se conoce como punto de ignición.
- *Análisis Termogravimétrico, TGA.* El análisis TGA se realizó empleando un equipo TA Instruments modelo Hi-Res TGA 2950 en atmosfera inerte de Nitrógeno desde temperatura ambiente hasta 600°C.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización fisicoquímica y composicional

- *Dilución en n-heptano.* En la Figura 2 se presenta el ensamblaje experimental para este ensayo.

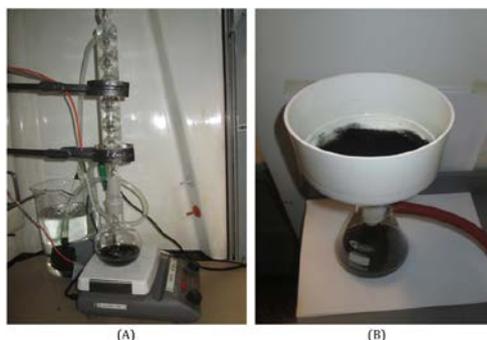


Figura 2. Digestión de gilsonita en n-heptano (A), separación de la fracción asfáltica y malténica por filtración al vacío (B)

El porcentaje estimado de asfaltenos en la gilsonita fue de 68,84%. Dicho resultado representa un valor muy elevado de la fracción asfáltica si se compara con un asfalto convencional en el cual el porcentaje de asfaltenos oscila entre 15 y 22%; sin embargo, es congruente con los valores típicos reportados para la gilsonita. Los resultados de la separación de ambas fracciones explican las características físicas de la gilsonita en condiciones ambientales; los asfaltenos se relacionan con la fracción más pesada de los hidrocarburos mientras que los maltenos se asocian con la fase aceitosa. En ese sentido, el alto contenido de asfaltenos en la gilsonita es el motivo de la dureza y fragilidad de este material.

- *Fraccionamiento SARA (Saturados, Asfaltenos, Resinas y Aromáticos).* Los resultados del fraccionamiento SARA se presentan en la Tabla 3 y las fracciones en la Figura 3. Se aprecia que los componentes saturados representan la menor cantidad en la gilsonita, además, los valores de aromáticos y resinas también son bajos respecto a valores en asfaltos convencionales. El cálculo del IC (ecuación (1)) da como resultado 2,34, un valor alto comparado con el valor de referencia 0,9. Este resultado indica que la gilsonita en su estado puro no representa un material adecuado para su uso como ligante asfáltico. De otra parte, este ensayo abre la posibilidad de encontrar aditivos con los que se puedan complementar las fracciones faltantes de la gilsonita. El uso de residuos industriales para este propósito abre todo un abanico de posibles formulaciones de productos basados en gilsonita.

$$IC = \frac{W_{\text{saturados}} + W_{\text{asfaltenos}}}{W_{\text{aromáticos}} + W_{\text{resinas}}} \quad (1)$$

Donde W: fracción en masa de cada componente

$$IC = \frac{1,22 + 68,84}{13,05 + 16,89} = 2,34$$

Tabla 3. Resultado de fraccionamiento SARA

Fracción	Resultado (%)
Asfaltenos	68,84
Saturados	1,22
Aromáticos	13,05
Resinas	16,89

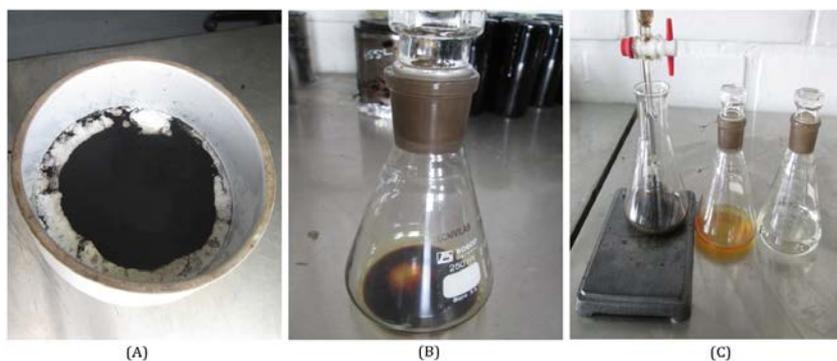


Figura 3. Fracción asfáltica retenida en el papel filtro (A), fracción malténica (B) y fraccionamiento de los maltenos en saturados (transparentes), aromáticos (marrón claro) y resinas (marrón oscuro) (C)

- **Análisis elemental.** En la Figura 4 se observa el montaje experimental para realizar este análisis. Los resultados del análisis composicional se presentan en la Tabla 4. Un análisis comparativo entre los resultados de la Tabla 4 y los valores reportados de la Tabla 2 se aprecia que la composición química de la gilsonita varía incluso para Colombia. Esto se debe a que se trata de un material que varía su composición en función del estrato del donde se ha extraído [21].

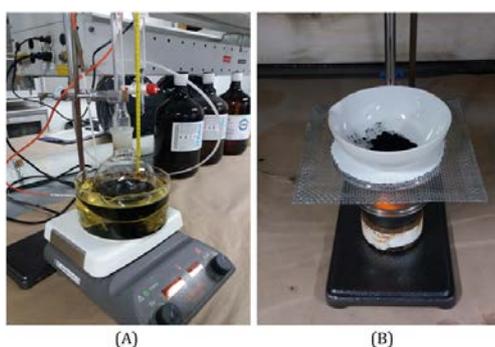


Figura 4. Montaje para la determinación de humedad en gilsonita (A) y calcinación inicial de la gilsoita para determinar cantidad de material inorgánico o cenizas (B)

Tabla 4. Resultado análisis elemental

Elemento	Porcentaje (%)
Carbono (C)	72,20
Hidrógeno (H)	7,80
Nitrógeno (N)	8,40
Azufre (S)	0,64
Oxígeno (O)	6,37
Humedad	0,62
Cenizas	3,97

- **Análisis Espectroscópico**
 1. **Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier FTIR.** Los principales rasgos del espectro FTIR de la gilsonita son las bandas características de materiales bituminosos entre 2800-3000 cm^{-1} debidas al estiramiento asimétrico y simétrico del enlace C-H típico de cadenas alifáticas saturadas (ver Figura 5). El hecho de que a 2920 cm^{-1} haya una intensidad mayor que en 2850 cm^{-1} implica la existencia de largas cadenas alifáticas en la gilsonita [15, 22]. La banda en 1450 cm^{-1} se debe a frecuencias de flexión del enlace asimétrico C-CH₃ y/o metileno; mientras que, la banda en 1378 cm^{-1} se debe a flexión simétrica del enlace C-CH₃. Las bandas entre 720-900 cm^{-1} se asocian con vibraciones típicas de enlace C-H del anillo bencénico [15, 23, 24]. Las bandas entre 1950-2400 cm^{-1} son muy poco usuales en los espectros FTIR de hidrocarburos y no representan relevancia para la interpretación del espectro. No obstante, en caso de que aparezcan como en este caso su presencia puede deberse a enlaces triples $\text{C}\equiv\text{C}$, $\text{C}\equiv\text{O}$ o $\text{C}\equiv\text{N}$ [25].

En este punto resulta importante aclarar el concepto de oxidación de los asfaltos. Por lo general, un espectro FTIR de un asfalto envejecido presenta una banda característica en 1700 cm^{-1} del grupo carbonilo C=O [26], [27, 28]. En este espectro no se aprecia dicha banda; lo que implica que la gilsonita a pesar de tener un porcentaje elevado de la fracción asfáltica no se ha envejecido, sino que ha perdido componentes livianos de la fracción malténica. Lo cual resulta aceptable puesto que la gilsonita ha estado expuesta a condiciones ambientales por largos periodos de tiempo y no a las condiciones de refinación del crudo que representan condiciones de temperatura y presión más extremas.

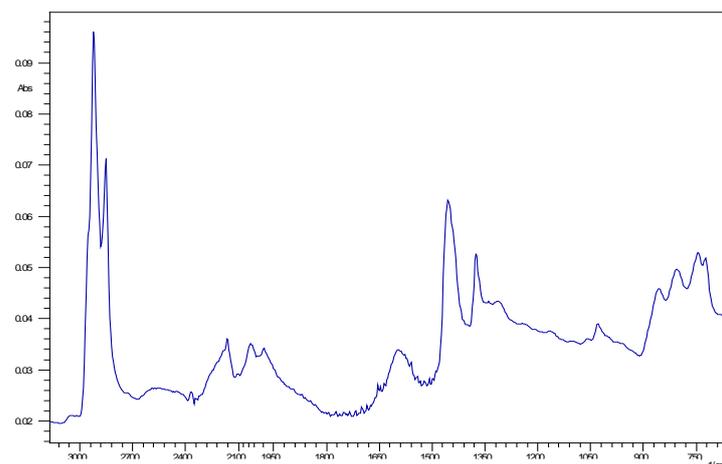


Figura 5. Espectro FTIR de la gilsonita

2. *Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X, XRF.* En la Tabla 5 se presentan los resultados del análisis por XRF.

Tabla 5. Resultado del análisis por Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X

Elemento	Unidad	Resultado
Azufre (S)	%	13,97
Silicio (Si)	%	2,17
Vanadio (V)	ppm	5884,00
Aluminio (Al)	ppm	2824,00
Hierro (Fe)	ppm	2460,00
Potasio (K)	ppm	1585,00
Magnesio (Mg)	ppm	1391,00

Los resultados indican que la gilsonita estudiada presenta bajos contenidos de azufre y vanadio en la fracción inorgánica. Este resultado revela que su uso para formulación de productos no representa peligros ambientales o riesgos asociados a su manipulación. Es importante tener en cuenta la variabilidad que tiene la gilsonita en los diferentes estratos; por ejemplo, se han encontrado gilsonitas colombianas que alcanzan contenidos de Azufre hasta de 72% [29]. En cualquier caso, se deberá realizar el análisis ambiental del lixiviado de los productos desarrollados a base de gilsonita.

- *Punto de ablandamiento y punto de ignición.* En la Figura 6 se muestra el montaje experimental para la determinación de estas propiedades; el fluido utilizado fue glicerina. En la Tabla 6 se presentan los datos de la caracterización física de la gilsonita.

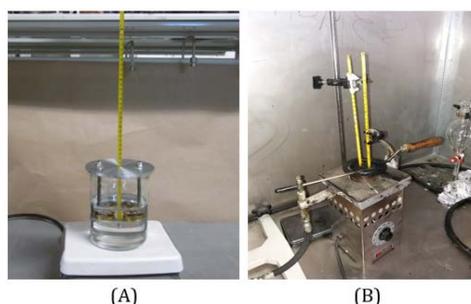


Figura 6. Aparato de bola y anillo para determinar punto de ablandamiento (A) y copa abierta de Cleveland para determinar punto de ignición (B)

Tabla 6. Caracterización física de la gilsonita

Parámetro	Característica/magnitud	Unidad
Color en masa	Negro	-
Color en polvo	Marrón oscuro	-
Penetración a 25°C	0,00	0,10 mm
Punto de ablandamiento	214±5	C
Punto de ignición	260,00	C

El valor obtenido como punto de ablandamiento resultó ser muy alto si se compara con los asfaltos convencionales (40-60 C) e inclusive con los asfaltos modificados con polímeros. Sin embargo, no es extraño para un material con un contenido de asfaltenos tan elevado. El valor alto del punto de ablandamiento explica la estabilidad térmica y la dureza de la gilsonita.

Dado que el punto de inflamación indica la tendencia de una determinada muestra a formar una mezcla inflamable con el aire en condiciones controladas, los resultados de este ensayo se deben tomar como punto de partida para tomar precauciones de manipulación en planta y diferentes operaciones con materiales asfálticos, pero no como un valor determinante de riesgo de combustión en condiciones de un incendio real; para ello se deben tener en cuenta parámetros adicionales. El punto de ignición mostrado para la gilsonita en la Tabla 6 es más elevado que el valor mínimo establecido por la normativa colombiana para el punto de inflamación que es de 230°C para asfaltos [30]. Por lo tanto, la gilsonita objeto de este estudio no resulta un material con riesgos asociados al punto de inflamación. Además, en ninguna de las operaciones con gilsonita y asfaltos convencionales y/o modificados se logra alcanzar ese valor de temperatura.

- **Análisis Termogravimétrico, TGA.** En la Figura 7 se observa el comportamiento de la muestra analizada respecto a la variación en temperatura. Se aprecia que hasta 200°C la pérdida en peso de la gilsonita es relativamente baja. En la Tabla 7 se presentan valores de temperatura y la pérdida de masa en ese punto. Dichos valores son importantes debido a que la temperatura promedio de los materiales asfálticos en planta es 165°C; la temperatura de modificación de asfaltos es 180°C y 220°C es el valor próximo al punto de ablandamiento de la gilsonita.

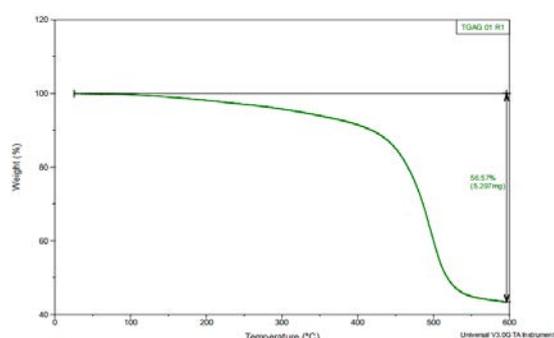


Figura 7. Diagrama TGA desde temperatura ambiente hasta 600°C

Del termograma de la gilsonita se aprecia que es un material muy estable térmicamente hasta las temperaturas características de procesamiento de asfaltos. Hasta los 220,14°C, valor aproximado del punto de ablandamiento, la pérdida de masa solo alcanza el 2,28% que es relativamente bajo.

Tabla 7. Temperaturas características y pérdida de masa de la gilsonita en el procesamiento de ligantes asfálticos

Temperatura (C)	Peso (%)	Pérdida de masa (%)
25,11	100,00	0,00
165,16	98,82	1,18
180,52	98,54	1,46
200,08	98,15	1,85
220,14	97,72	2,28

3.2 Formulación del lodo asfáltico

Se realizó una mezcla de gilsonita con aditivos de diferente naturaleza: residuos de aceite mineral, aceite vegetal, un solvente derivado de petróleo y una resina comercial. La formulación de la mezcla se hizo de acuerdo con los porcentajes en masa mostrados en la Tabla 8, teniendo en cuenta resultados de ensayos previos realizados con estos materiales. La mezcla resultante se agitó a 3000 rpm durante 2 h a temperatura ambiente; se dejó en reposo durante un período de 48 h y se repitió el proceso de mezclado bajo las mismas condiciones. El resultado fue un lodo asfáltico de consistencia líquida y color negro.

Tabla 8. Formulación en porcentaje en masa del lodo asfáltico

Gilsonita	Residuo aceite mineral	Aceite vegetal	Solvente de petróleo	Resina	Total
0,52	0,22	0,14	0,07	0,05	1

3.3 Elaboración de mezclas asfálticas

En la elaboración de la mezcla asfáltica se utilizó una granulometría para mezcla en caliente de gradación continua MDC-19 para capa de rodadura, según especificación del INVIAS [31], Tabla 9. El diseño experimental consistió en aditar el agregado pétreo con cinco dosificaciones: 5,5%, 6,0%, 6,5%, 7,0% y 7,5% del lodo asfáltico y llevar a cabo el análisis por triplicado, para un total de 15 probetas.

Tabla 9. Límites granulométricos para MDC-19 [31]

Tamiz	3/4	1/2	3/8	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
% Pasa	100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8

La metodología de mezclado consistió en llevar el agregado a 165°C, luego, adicionar el lodo asfáltico frío directamente al agregado caliente para posteriormente mezclarlo a 165°C durante 30 min. La mezcla así obtenida se dispuso en el molde de compactación a 165°C, se compactó y las probetas obtenidas se dejaron curar por 2 h a temperatura ambiente. Las probetas se elaboraron siguiendo la metodología de mezclado y compactación Marshall (Figura 8).

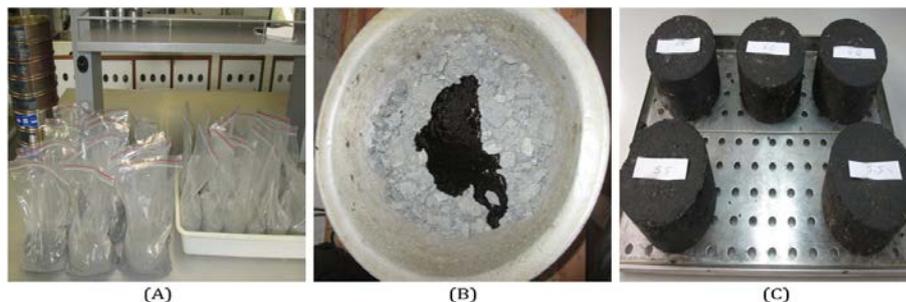


Figura 8. (A) Preparación de granulometría MDC-19; (B) mezclado del lodo asfáltico y el agregado; (C) probetas elaboradas con el producto formulado según metodología Marshall

En el procedimiento de mezclado se observa la generación de vapores provenientes de uno o varios de los aditivos de formulación; no de la gilsonita ya que este material es estable a la temperatura de mezcla, de acuerdo con los resultados del análisis térmico TGA. Las probetas resultante si bien mantuvieron la forma del molde de compactación, en los bordes de la mismas se observa desprendimiento de material que puede ser indicativo de falta de adherencia.

Cuando se lleva a cabo una mezcla asfáltica con asfalto convencional, este se calienta hasta que tenga una viscosidad específica y se adiciona al agregado. Para este caso no fue necesario calentar el lodo debido a que su consistencia es líquida. Sin embargo, se ha explorado una metodología de modificación del lodo con polímeros para lograr una consistencia similar a la de un asfalto convencional y lograr un proceso de mezclado similar al ya establecido para asfaltos tradicionales.

3.4 Estabilidad y flujo Marshall

Ensayo realizado de acuerdo con la norma INV E - 748 - 13. Las probetas se sometieron a una temperatura de 60°C durante 2 h antes de ser falladas en la máquina universal (Figura 9). En la Tabla 10 se presentan los resultados de estabilidad y flujo.



Figura 9. Ensayo de estabilidad y flujo Marshall

Tabla 10. Resultados de estabilidad y flujo de las probetas aditivas con el lodo asfáltico

Dosificación	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Estabilidad promedio (N)	Flujo Promedio (mm)	Relación estabilidad/flujo (kN/mm)
5,50	8753	2,16	7783,00	2,29	3,40
5,50	9329	1,65			
5,50	9068	3,06			
6,00	10578	1,73	9192,54	2,02	4,55
6,00	11098	2,30			
6,00	10391	2,04			
6,50	14674	1,70	10969,84	1,99	5,51
6,50	11190	2,38			
6,50	11113	1,88			
7,00	11025	1,88	9093,50	2,08	4,37
7,00	10325	1,91			
7,00	10615	2,46			
7,50	8812	2,24	8069,81	1,88	4,29
7,50	9655	1,94			
7,50	10256	1,45			

En la Tabla 11 se presentan los valores exigidos por la normativa colombiana para el ensayo de estabilidad y flujo [31]. Según los resultados obtenidos y los valores de referencia mostrados en la Tabla 11, el lodo asfáltico formulado a partir de gilsonita presenta propiedades adecuadas para su uso como ligante asfáltico. La estabilidad mínima obtenida fue de 7783 N mayor que los 7500 N exigidos para un nivel de tránsito tipo NT2 y los valores de flujo están muy cercanos al mínimo exigido por la normativa. La dosificación de 6,50% fue la de mayor estabilidad dando como resultado un flujo de 1,99 mm que es menor al aceptado por la normativa colombiana del INVIAS, pero la relación estabilidad/flujo resulta ser mayor a la permitida. En este sentido, solo la dosificación de 5,50% cumple el rango de la relación para estabilidad/flujo.

Tabla 11. Valores para diseño preliminar de la mezcla asfáltica según ensayo Marshall [31]

Característica	Categoría de tránsito			Mezcla de alto módulo
	NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)	50	75	75	75
Estabilidad mínima (N)	5000	7500	9000	15000
Flujo (mm)	2-4	2-4	2-3,50	2-3
Relación estabilidad/flujo (kN/mm)	2-4	3-5	3-6	-

4. CONCLUSIONES

La gilsonita es un material con elevado contenido de asfaltenos y consecuentemente con un IC relativamente alto. Esta fracción representa la dureza del asfalto y al combinarla con agregado la mezcla resultante será susceptible a la falla por fatiga a bajas temperaturas. De otra parte, su alto punto de ablandamiento y su penetración cero indican que se requiere alcanzar una temperatura muy elevada para que la gilsonita se comporte como líquido, lo que conlleva costos asociados al alto gasto energético. Por todo esto, el uso de la gilsonita por sí misma en pavimentos flexibles no resulta promisorio para este tipo de aplicaciones.

Los resultados evidencian que es posible emplear cierto tipo de aditivos con el potencial de complementar algunas de las fracciones malténicas faltantes en la gilsonita. En tal sentido, es posible establecer escenarios de investigación para el desarrollo de nuevos materiales que impliquen el uso de residuos industriales afines y/o de la misma naturaleza química de la gilsonita.

La metodología de mezclado y compactación del lodo asfáltico y agregado aplicada en esta investigación es diferente a la utilizada con asfaltos convencionales y tuvo incidencia en los resultados de adherencia. Esto sugiere la necesidad de realizar estudios específicos de los parámetros de mezclado en condiciones simuladas de planta y evaluar los resultados de adherencia.

Aunque los valores de flujo se ubicaron muy cerca al límite establecido por la norma y con incidencia directa en la relación de estabilidad/flujo, cabe resaltar que los valores de estabilidad sí resultaron prometedores. Así pues, surgen temáticas específicas de investigación que deben estar orientadas al mejoramiento del flujo para obtener más y mejores productos a base de gilsonita para aplicaciones en infraestructura vial que cumplan con los parámetros de la normativa colombiana del INVIAS.

Los resultados presentados en este trabajo son la primera aproximación hacia el desarrollo de un ligante que incluya en su formulación la gilsonita así como aditivos de diferente naturaleza y origen. Las perspectivas de investigación en este campo son amplias, ya que se requieren alternativas que vayan desde la formulación y desarrollo del lodo asfáltico hasta el estudio de metodología de mezclado y compactación con el fin de optimizar los parámetros de flujo y desempeño de un ligante asfáltico alternativo al asfalto convencional procedente de las refinerías.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia, Gobernación de Putumayo y Minciencias por el apoyo para llevar a cabo esta investigación a través del Programa para la Formación de Capital Humano de Alto Nivel para el Departamento del Putumayo- 2016.

REFERENCIAS

- [1] Shisong, R. et al. (2018). Investigating the effects of SBR on the properties of gilsonite modified asphalt. *Construction and Building Materials* 190, 1103-1116.
- [2] Kazemi, H., Ghanavati, B. y Ghale, T. (2011). Properties of modified bitumen obtained from natural bitumen by adding pyrolysis fuel oil. *International Journal of Chemical Engineering and Applications* 2, 168-172.
- [3] Rondón, H., Sánchez, E. y Castaño, J. (2014). Resistencia bajo carga monotónica de mezclas de concreto asfáltico modificadas con gilsonita por vía seca. *Tecnura*, edición especial, 31-37.
- [4] Encyclopedia Britannica. (2020). Asphaltite. Recuperado: <http://www.britannica.com/science/asphaltite>.
- [5] Santos, D. y Luna, R. (2012). Asfaltos naturales: La mapia y la asfaltita, alternativas de construcción para obras de infraestructura vial en el contrato ruta del sol tramo 1. Universidad Pontificia Bolivariana.

- [6] Helms, J. et al. (2012). Structural characterization of gilsonite bitumen by advanced nuclear magnetic resonance spectroscopy and ultrahigh resolution mass spectrometry revealing pyrrolic and aromatic rings substituted with aliphatic chains. *Organic Geochemistry* 44, 21-36.
- [7] Alarcon, L. (2014). Uso de asfaltitas para pavimentos en vías terciarias en Boyacá y Cundinamarca en la república de Colombia. Universidad Militar Nueva Granada.
- [8] Grupo GCA SAS. (2020). Gilsonita. Recuperado: <http://www.grupogca.co>.
- [9] Mahmoud, A. et al. (2011). Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction. *Construction and Building Materials* 25, 1379-1387.
- [10] Magalhães, C. y Benvindo, A. (2003). Insumos minerais para perfuração de poços de petróleo. CETEM/UFPE.
- [11] Anaya, M. y Díaz, A. (2011). Asfaltita sus posibilidades como combustible. En IX congreso Cubano de Geología. La Habana.
- [12] Cobbold, P. et al. (2011). Combustibles sólidos (asfaltita). En 18º Congreso Geológico Argentino. Relatorio de XVIII congreso geológico argentino. Neuquén, Argentina.
- [13] Higuera, C., Salamanca, E. y Santos C. (2013). Caracterización de las asfaltitas de Pesca Boyacá-Cantera Santa Teresa. *Respuestas* 18, 18-24.
- [14] Reyes, F., Daza, C. y Rondón, H. (2012). Determinación de las fracciones SARA de asfaltos colombianos envejecidos al medio ambiente empleando cromatografía líquida en columna. *Revista EIA* 17, 47-56.
- [15] Nciri, N. et al. (2014). Chemical characterization of gilsonite bitumen. *Petroleum & Environmental Biotechnology* 5, 1-10.
- [16] Liu, J. y Li, P. (2008). Experimental Study on Gilsonite-modified Asphalt. *Airfield and Highway Pavements* 45, 222-228.
- [17] Instituto Nacional de Vías. (1997). La asfaltita como modificador de los asfaltos colombianos. Bogotá.
- [18] Rondón, H. y Reyes, F. (2012). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con asfaltita. *Revista de ingeniería* 36, 12-19.
- [19] Yasar, E. (2015). Obtaining of modified bitumen with optimum quality through mixing of natural bitumen (gilsonite), bitumen and thinner oil. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour* 12, 103-107.
- [20] Tang, N. et al. (2016). Investigation of Gilsonite-, polyphosphoric acid- and styrene-butadiene-styrene-modified asphalt binder using the multiple stress creep and recovery test. *Road Materials and Pavement Design* 45, 1-15.
- [21] Mirzaiyan, D. et al. (2019). Evaluation of the performance and temperature susceptibility of gilsonite- and SBS- modified asphalt binders. *Construction and Building Materials* 34, 679-692.
- [22] Zhang F. y Yu, J. (2010). The research for high-performance SBR compound modified asphalt, *Construction and Building Materials* 24, 410-418.
- [23] Manohar, N. et al. (2017). A unique application of the second order derivative of FTIR-ATR spectra for compositional analyses of natural rubber and polychloroprene rubber and their blends. *Polymer Testing* 56, 447-453.
- [24] Yao, H. et al. (2013). Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy. *Construction and Building Materials* 38, 327-337.
- [25] Mondragón, P. (2017). Espectroscopía de infrarrojo para todos. CIATEJ.
- [26] Fang, C. et al. (2012). Aging properties and mechanism of the modified asphalt by packing waste polyethylene and waste rubber powder. *Polymer advanced technologies* 1(24), 33-42.
- [27] Wang, S., Yuan, C. y Jiayi, D. (2014). Crumb Tire Rubber and Polyethylene Mutually Stabilized in Asphalt by Screw Extrusion. *Journal of Applied Polymer Science* 38, 1-7.
- [28] Qian, C. et al. (2019). Influence of polyphosphoric acid (PPA) on properties of crumb rubber (CR) modified asphalt. *Construction and Building Materials* 227, 1-13.
- [29] Vélez, J., Velásquez, S. y Giraldo, D. (2016). Mechanical and rheometric properties of gilsonite/carbon black/ natural rubber compounds cured using conventional and efficient vulcanization systems. *Polymer testing* 19, 56, 1-9.
- [30] Instituto Nacional de Vías. (2014). Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Capítulo 4, artículos 410-413. INVIAS.
- [31] Instituto Nacional de Vías. (2014). Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Capítulo 4, artículo 450. INVIAS.

Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de un suelo vial aditivado con productos químicos

Eliana Llano
Gloria Restrepo
Dairo Vanegas
Universidad de Antioquia
Colombia

El deterioro y agotamiento de las fuentes de materiales que tradicionalmente son usados para la construcción de infraestructura vial, ha estimulado el desarrollo de tecnologías alternativas para estas aplicaciones. La estabilización química se presenta como una solución técnica, económica y ambientalmente sostenible, que consiste en el uso de productos químicos para mejorar las propiedades ingenieriles del suelo. Estos productos pueden clasificarse en puzolanas, polímeros, organosilanos, aceites sulfonados, sales orgánicas, emulsiones enzimáticas, sales inorgánicas, emulsiones asfálticas. En este trabajo se utilizó un suelo arcilloso proveniente de una vía del municipio de Valencia (Córdoba), que fue caracterizado y aditivado con siete estabilizantes de diferente naturaleza química, cuyo efecto se determinó evaluando los cambios fisicoquímicos y mecánicos que se evidencian en el suelo al ser aditivado con estos productos. La caracterización de los materiales se realizó empleando distintas técnicas analíticas e instrumentales tales como: pH, conductividad, Capacidad de Intercambio Catiónico CIC, Área superficial por el método BET y Microscopía Electrónica de Barrido SEM. La evaluación del desempeño mecánico se realizó mediante diversos ensayos tales como: determinación de las relaciones densidad – humedad o Proctor estándar, Capacidad de soporte CBR, resistencia a la compresión no confinada, Límites de Atterberg, velocidad de ascenso capilar y desgaste superficial. Estas técnicas fueron aplicadas tanto al suelo natural como a los sistemas aditivados. Los resultados obtenidos para el suelo tratado con los productos químicos, mostraron un aumento en la resistencia a la compresión, una disminución del pH, la conductividad y el área superficial, así como cambios morfológicos y texturales respecto al suelo natural.

1. INTRODUCCIÓN

La estabilización química de suelos consiste en el empleo de productos químicos para mejorar las propiedades ingenieriles de los suelos, reduciendo su plasticidad y haciéndolos más resistentes, ante la acción del tráfico y condiciones ambientales. En general el uso de aditivos químicos tiene como objetivo principal incrementar en el suelo tratado, en un espesor definido, la capacidad de soportar cargas sin deformación, y mejorar o reducir la pérdida de capa de rodadura o erosión por tráfico pesado o factores climáticos [1]. Los productos químicos, empleados como aditivos para el mejoramiento de suelos, incluyen una amplia gama de materiales que pueden clasificarse según su naturaleza química en: polímeros, aceites sulfonados, sales, organosilanos, puzolanas, enzimas [2].

Los aditivos poliméricos líquidos, incluidos varios precursores de polímeros, biopolímeros, resinas y emulsiones, se han utilizado como estabilizantes químicos del suelo para aumentar la resistencia mecánica, mitigar la licuefacción del suelo, reducir la permeabilidad y mejorar la resistencia a la acción de la intemperie [3-5]. Estos aditivos crean una unión covalente entre los centros activos del polímero y las partículas del suelo, lo cual genera una superficie hidrófoba que favorece la pérdida de humedad del suelo debido a la formación de largas cadenas de monómeros presentes en el agente estabilizador; el polímero además crea una fuerza de adhesión entre las partículas incrementando la cohesión y reduciendo la plasticidad del suelo, formando una masa sólida y resistente [6].

Los aditivos enzimáticos son proteínas que generalmente se encuentran como catalizadores en sistemas biológicos, es decir, aceleran la velocidad de reacción sin involucrarse en la formación de nuevos productos [7]. En el caso de suelos finos tratados con aditivos enzimáticos, se ha encontrado que estos actúan reduciendo el espesor de la capa de agua que se adhiere a la superficie de las arcillas y, consecuentemente, mejoran propiedades del suelo como la resistencia mecánica y la permeabilidad [8, 9].

Los aceites sulfonados son compuestos orgánicos derivados de sulfuros y ácidos combinados que actúan como agentes catalizadores que producen intercambio de iones. La función más importante de estos productos es la reducción del agua contenida entre las partículas del suelo aumentando el número de vacíos, lo que permite el acomodamiento de las partículas, bien sea por atracción entre ellas o por compactación [10]. Los principales efectos que tiene el aceite sulfonado sobre los suelos de matriz arcillosa son: reducción de espacios intersticiales, hinchamiento y permeabilidad; aumento de la densidad y la resistencia del suelo; mejora de la respuesta a la compactación [11].

Los organosilanos son materiales usados en construcción en una amplia gama de aplicaciones como promotores de adhesión, agentes de acoplamiento, agentes de reticulación, agentes dispersantes y modificadores de superficie. Entre las propiedades que pueden ser mejoradas con el uso de organosilanos se puede resaltar la alta repelencia al agua que presentan los materiales aditivados con estos productos [12]. Así mismo, se ha encontrado que el uso de estos productos en suelos arcillosos mejora considerablemente la resistencia mecánica y disminuye el coeficiente de permeabilidad [13].

Los estabilizantes de naturaleza puzolánica aportan mejoras significativas en la resistencia mecánica del material. Las reacciones puzolánicas consisten en la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina amorfos o débilmente cristalizados en un medio altamente alcalino como el creado por una solución de hidróxido de calcio, generándose aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos similares a los obtenidos en el fraguado del cemento Portland [14].

En este trabajo se evaluaron las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de un suelo arcilloso al ser tratado con siete productos químicos comerciales. Teniendo en cuenta además que las propiedades que exhiben los materiales a escala macro son el resultado de su estructura y composición a escalas menores, se estudiaron los cambios morfológicos y composicionales que presentan los materiales usando técnicas de caracterización tales como: Área superficial por el método BET, Microscopía Electrónica de Barrido SEM, pH, Conductividad y Capacidad de Intercambio Catiónico CIC.

2. MÉTODO

2.1 Materiales

Para el estudio se usaron los siguientes materiales:

- *Suelo*: se empleó un suelo natural procedente de una vía no pavimentada ubicada en el municipio de Valencia, departamento de Córdoba, el cual se describe como un suelo arcilloso de color pardo rojizo. Este tipo de suelo presenta características muy desfavorables respecto a sus propiedades ingenieriles, tal como se puede apreciar en los datos presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de la caracterización del suelo. Fuente: autores

Ensayo	Resultado
Clasificación AASTHO	A-7-6 (13)
Clasificación SUCS	CL
% Pasante malla 4	99.16
% Pasante malla 40	85.85
% Pasante malla 200	72.62
Limite Líquido	43
Limite plástico	22
Índice de Plasticidad	21
Densidad real (g/cm ³)	2.68
Materia orgánica por ignición (%)	3.9
Contenido de sulfatos (mg so ₄ /g)	0.48

- *Aditivos*: se emplearon productos comerciales representativos de distintas tipologías químicas de estabilizantes de suelos: polímeros, aceites sulfonados, organosilanos, puzolanas y enzimas; adicionalmente se evaluó también la cal y el cemento. En la Tabla 2 se muestran las dosificaciones establecidas para cada producto evaluado.

Tabla 2. Dosificaciones establecidas para evaluación de estabilizantes

Estabilizante	Dosificación
Polímero	7330 ml/m ³ ssc
Silano	1882,5 ml/m ³ ssc
Enzima	33 ml/m ³ ssc
Aceite sulfonado	233 ml/m ³ ssc
Zeolita	1,8 Kg/m ³ ssc
Cal	6 % peso seco
Cemento	180 Kg/m ³ ssc

2.2 Preparación de las muestras

Los sistemas aditivo-suelo se prepararon adicionando los estabilizantes al suelo con las dosificaciones establecidas. Posteriormente se agregó el agua necesaria para llevar el suelo a su humedad óptima. Por último, se procedió con el mezclado para asegurar la homogeneidad en todo el sistema. Se compactaron probetas cilíndricas de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura para ser sometidas al ensayo de resistencia a la compresión no confinada, desgaste y límites de Atterberg; probetas cilíndricas de 5 cm de diámetro por 5 cm de altura para realizar el ensayo de ascenso capilar; y probetas rectangulares para tomar muestra para los análisis fisicoquímicos: pH, conductividad, CIC, Área superficial y SEM. Estas probetas fueron compactadas hasta alcanzar su densidad máxima tomando como base la energía de compactación del Proctor estándar. Todas las muestras compactadas en laboratorio se sometieron a un ciclo de curado por 7 días en bolsas herméticas para preservar su humedad. Adicionalmente todos los ensayos se realizaron por duplicado.

2.3 Caracterización mecánica

Tanto el suelo natural como los sistemas aditivados se sometieron a los siguientes análisis de resistencia mecánica:

- *Determinación de las relaciones densidad – humedad en suelos, Proctor estándar.* Basado en la Norma INV- E 141-13: Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación)
- *Capacidad de Soporte de California CBR.* Basado en la norma INV E148-13: CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada
- *Resistencia a la compresión no confinada RCS.* Basada en la norma INV- E 152-13: Compresión inconfiada en muestras de suelos
- *Límites de Atterberg.* Basado en las normas INV E125-13 y INV E126-13: Determinación del Límite Líquido de los suelos y Límite Plástico e Índice de Plasticidad de suelos, respectivamente
- *Velocidad de ascenso capilar y tiempo de saturación.* Basado en un protocolo interno desarrollado por el grupo de investigación
- *Desgaste superficial.* Basado en un protocolo interno desarrollado por el grupo de investigación

2.4 Caracterización fisicoquímica

Tanto al suelo como a los sistemas aditivados, sometidos a 7 días de curado, se les realizaron los siguientes análisis fisicoquímicos:

- *Análisis textural y área superficial específica BET.* Este análisis se realizó en un equipo Micromeritics Gemini VII con adsorción de N₂, mediante la aplicación del método BET.
- *Microscopía Electrónica de Barrido, SEM.* Este ensayo se realizó empleando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6940 LV, con una resolución de 3nm en alto vacío y magnificación de hasta 300,000X.
- *Potencial de Hidrógeno, pH.* Basado en la norma NTC 5264: Calidad de suelo, determinación del pH.
- *Conductividad Eléctrica.* Basada en la norma NTC 5596: Calidad de suelo, determinación de la conductividad eléctrica. Resultados y análisis.
- *Capacidad de Intercambio Catiónico CIC.* Basada en la norma NTC 5268: calidad de suelo, determinación de la capacidad de intercambio catiónico

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Determinación de las relaciones densidad–humedad en suelos, Proctor estándar

Los resultados obtenidos para el ensayo Proctor, mostrados en la Tabla 3, evidencian que los productos estabilizantes generan una disminución de la humedad óptima, excepto para el polímero que se mantuvo igual a la del suelo. Esta disminución en la humedad óptima entre el 1 y 2% respecto a la muestra sin aditivo químico, se traduce en un ahorro del recurso hídrico en el momento de un proceso constructivo. Estos resultados ponen de manifiesto que los aditivos químicos mejoran las características de compactación en suelos arcillosos.

Tabla 3. Resultados óptimos obtenidos de las curvas de compactación para los sistemas de suelo aditivado

Material	Proctor Estándar	
	Densidad seca máxima (Kg/m ³)	Humedad óptima (%)
Suelo Natural	1626	22
Suelo + Aceite sulfonado	1647	21
Suelo + Polímero	1624	22
Suelo + Enzima	1635	20
Suelo + Organosilano	1614	20
Suelo + Cal	1621	20
Suelo + Cemento	1624	20

3.2 Capacidad de Soporte de California CBR

Los resultados obtenidos para la capacidad de soporte, mostrados en la Tabla 4, evidencian que la mayoría de los aditivos evaluados aumentan la capacidad de soporte y disminuyen la expansión; estos efectos resultaron ser más significativos en los productos de naturaleza puzolánica, puesto que por su mecanismo de reacción son los que más aportan a la resistencia mecánica de los suelos [15]. Para el caso del aceite sulfonado y la enzima, los resultados de capacidad de soporte estuvieron levemente por debajo respecto al del suelo sin aditivar. Todo lo cual indica que el uso de estos aditivos no representa una contribución significativa a la capacidad portante del tipo de suelo evaluado.

3.3 Resistencia a la compresión no confinada RCS

Los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión simple, mostrados en la Figura 1, evidencian que en general hay una mayor resistencia a la compresión en los suelos aditivados, comparados con los resultados obtenidos

para el suelo sin aditivar. Este aumento de resistencia es una respuesta muy favorable del suelo ante la presencia de los productos químicos evaluados; y se traduce en un mejor desempeño mecánico del material. Este comportamiento muestra la viabilidad técnica de usar aditivos químicos como soluciones sostenibles para el mejoramiento del suelo [16]. Igualmente se destaca el aumento del esfuerzo soportado a los 7 días de curado; aumento que es más notorio para los suelos aditivados con los productos de naturaleza puzolánica: cal, cemento y zeolita, corroborándose así la importancia que tiene el período de curado [17].

Tabla 4. Resultados ensayos CBR para los sistemas de suelo aditivado

Material	CBR	Expansión (%)
Suelo Natural	5.0	1.1
Suelo + Aceite Sulfonado	4.5	2.6
Suelo + Polímero	9.7	1.1
Suelo + Enzima	4.2	0.5
Suelo + Organosilano	5.7	1.1
Suelo + Cal	39.2	0.3
Suelo + Cemento	105.7	0.02
Suelo + Zeolita	140.6	0.1

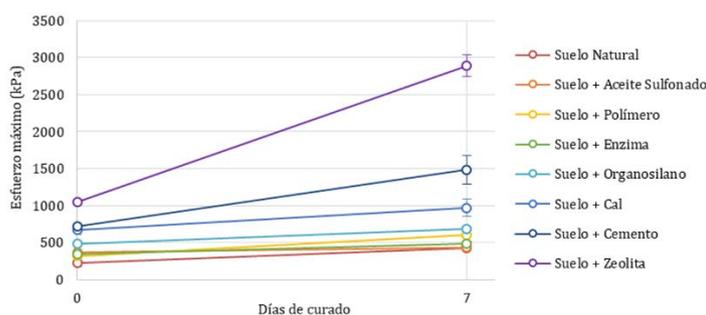


Figura 1. Resultados de resistencia a la compresión no confinada para los sistemas de suelo aditivado

3.4 Límites de Atterberg

Los resultados obtenidos muestran en general que el límite líquido y el límite de plasticidad no tienen una tendencia definida y su comportamiento es propio de cada aditivo, Tabla 5. Sin embargo, cabe resaltar que para el índice de plasticidad sí se observa que los sistemas aditivados, excepto el organosilano, presentan valores menores respecto a los resultados obtenidos para el suelo sin aditivar. Este comportamiento es destacable en los productos cementantes; en particular para la zeolita este índice se anula, incluso desde los 0 días de tratamiento.

Tabla 5. Resultados de límites de Atterberg e índice de plasticidad para los sistemas de suelo aditivado

Material	Límite Líquido		Límite Plástico		Índice de Plasticidad	
	0 días	7 días	0 días	7 días	0 días	7 días
Suelo Natural	48	47	27	22	21	25
Suelo + Aceite Sulfonado	44	46	23	25	21	21
Suelo + Polímero	49	45	28	22	21	23
Suelo + Enzima	45	48	24	23	21	25
Suelo + Organosilano	52	54	28	24	24	30
Suelo + Cal	46	43	33	32	13	11
Suelo + Cemento	51	41	35	33	16	8
Suelo + Zeolita	NP	NP	NP	NP	NP	NP

3.5 Velocidad de ascenso capilar y tiempo de saturación

En la Figura 2 se presentan los resultados de ascenso capilar obtenidos para cada producto evaluado. Se destaca el suelo aditivado con el organosilano por presentar un elevado tiempo de saturación y una velocidad de ascenso capilar mucho menor respecto a los otros productos, Figura 2 (a) y Figura 2 (b). Este comportamiento es atribuible a que los organosilanos contienen una larga cadena de alquilos, que es responsable de generar propiedades hidrofóbicas en las superficies tratadas [18, 19].

Por otro lado, las probetas aditivadas con cal, cemento y zeolita presentan similitudes, mostrando para este caso una gran facilidad para absorber agua en cortos periodos de tiempo. Esto se debe a que la estabilización de suelos con estos productos cementantes hace que la distribución de los poros y su tamaño aparente se modifiquen, de modo que la estructura capilar presenta favorabilidad a la absorción de agua por ascenso capilar. Esta capacidad de absorción no es favorable en muchos casos, principalmente cuando el suelo tratado está expuesto a la intemperie o es susceptible al ascenso capilar de aguas subterráneas, como podría acontecer naturalmente en la infraestructura vial. Para el resto de materiales evaluados estos parámetros presentaron poca variación con respecto a las características del suelo sin aditivar.

Durante el desarrollo de la prueba de ascenso capilar también se registró la cantidad de suelo desprendido durante el ensayo, Figura 2 (c). La cal, el cemento y la zeolita presentaron los valores más bajos debido a sus propiedades cementantes. El suelo tratado con enzima fue el sistema que presentó mayor desprendimiento, presentando un desprendimiento total dos veces mayor que el del suelo sin aditivado. Esto evidencia la susceptibilidad de este producto para presentar erodabilidad en condiciones de humedad.

Respecto al parámetro de hinchamiento, Figura 2 (d), en las arcillas se da por la absorción de agua entre los espacios laminares de las partículas de suelo, lo cual genera separación de las láminas y consecuentemente hinchamiento de la probeta. Los cationes que más favorecen el hinchamiento son los de sodio Na^+ , mientras que los que mejor controlan esta propiedad son los cationes de calcio: Ca^{2+} y Mg^{2+} . En consecuencia, los suelos que menor porcentaje de hinchamiento presentaron fueron los aditivados con cemento, cal y zeolita, favorecidos por la presencia de los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} . Por otro lado, el suelo aditivado que mayor porcentaje de hinchamiento presentó fue el tratado con polímero; comportamiento atribuible a sus características de compactación. Para el producto polimérico evaluado se obtuvo la misma humedad óptima del suelo, pero menor densidad máxima seca en el ensayo del Proctor estándar; por tanto, las probetas de este sistema pueden ser más susceptible de absorber agua. El resto de muestras tuvieron un porcentaje de hinchamiento levemente por debajo respecto al suelo sin aditivo.

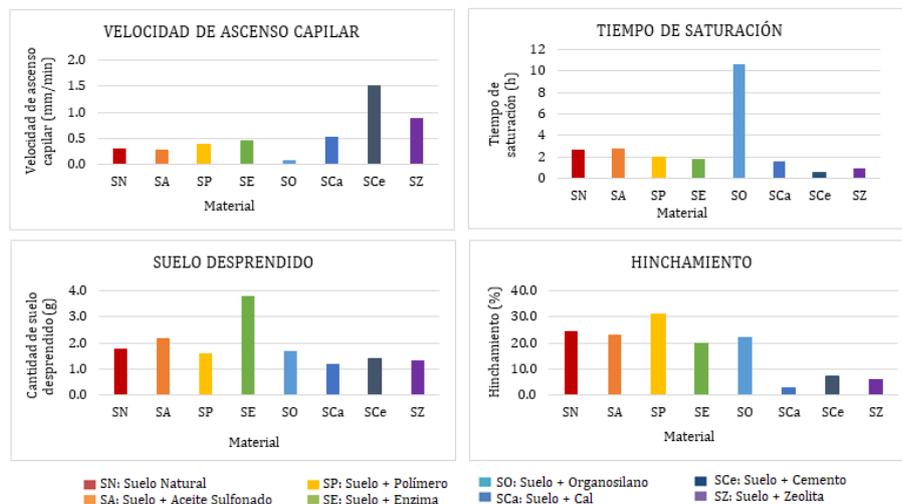


Figura 2. Resultados del ensayo de velocidad de ascenso capilar para los sistemas de suelo aditivado

3.6 Desgaste superficial

La prueba de desgaste superficial realizada sobre las probetas de los sistemas evaluados, muestra resultados interesantes que dan una noción de la erodabilidad y la generación de material particulado que podrían tener los suelos tratados con estos estabilizantes. En la Figura 3 se registra la masa de desgaste asociada a cada sistema aditivado; evidentemente el suelo tratado con el organosilano presenta un mayor grado de erosión que con el resto de estabilizantes. Este resultado es coherente con otros estudios que han demostrado que los organosilanos mejoran significativamente propiedades como la permeabilidad y resistencia al agua, pero son muy susceptibles al desgaste superficial. Para este tipo de aditivos se recomienda la aplicación de riegos superficiales, poliméricos o asfálticos, como protección ante el desgaste superficial que pueden sufrir a causa del tráfico [20].

Los aditivos que mejores resultados mostraron para este parámetro fueron el cemento y la zeolita. Estos productos se caracterizan por su alta capacidad cementante, lo que hace que se presente una mayor cohesión entre las partículas y consecuente una mayor resistencia a los agentes físicos. Por otra parte, la masa de desgaste presentada para el resto de aditivos se mantuvo cercana a la generada por el suelo sin aditivado; de donde se puede decir que estos estabilizantes no influyen significativamente en la susceptibilidad a la erosión ni a la posible generación de material particulado del suelo evaluado.

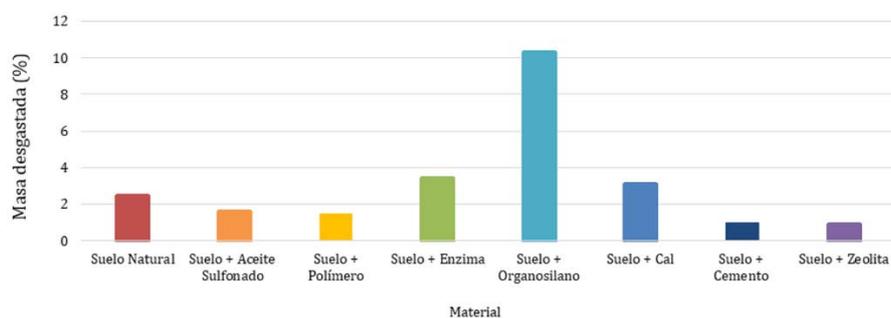


Figura 3. Resultados de las pruebas de desgaste para los sistemas de suelo aditivado

3.7 Análisis textural y área superficial específica BET

En la Tabla 6 se muestran los resultados del análisis textural realizado empleando el método BET. Se observa que con todos los aditivos se presenta la reducción del área superficial respecto a su valor en el suelo solo, así como reducción e indetección de la microporosidad. Estos resultados indican que los aditivos estudiados generan cambios en la textura del suelo, efecto que ha sido referenciado en otros estudios realizados con este tipo de materiales [21-23]. Dado que esta propiedad está estrechamente relacionada con la porosidad, la permeabilidad y el tamaño de partícula, posiblemente los sistemas aditivados presenten también cambios en el tamaño de las partículas.

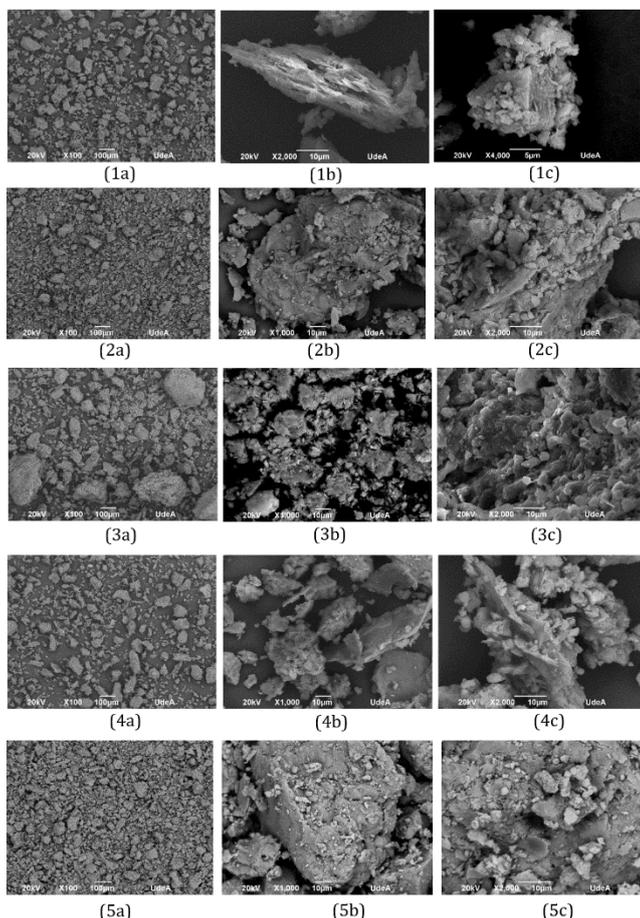
Tabla 6. Resultados de la caracterización textural para los sistemas de suelo aditivado

Material	S Área Superficial Específica (m ² /g)	S microporos (m ² /g)	S mesoporos (m ² /g)	V microporos (cm ³ /g)	V mesoporos (cm ³ /g)	Tamaño de Poro (Å)
Suelo sin aditivar	44.22	0.91	43.30	0.00028	0.10565	100.311
Suelo + Aceite Sulfonado	38.81	0.02	38.79	-	0.09142	94.102
Suelo + Polímero	34.53	0.10	34.43	-	0.08625	97.395
Suelo + Enzima	40.17	-	40.17	-	0.09986	95.869
Suelo + Organosilano	35.67	-	35.67	-	2.16190	1082.743
Suelo + Cal	25.73	-	25.73	-	0.10692	137.505
Suelo + Cemento	28.49	-	28.49	-	0.11342	140.704
Suelo + Zeolita	28.28	-	28.28	-	0.0947	131.107

3.8 Microscopía Electrónica de Barrido SEM

En la Figura 4 se muestran las imágenes obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido. Como característica morfológica inicial se observa un aumento considerable del tamaño de las partículas del suelo al ser aditivado con los productos, especialmente con el polímero y el organosilano donde se observan grandes aglomerados de partículas.

Así mismo, en las imágenes (1b) y (1c) se observan las formas típicas de las partículas de arcilla [24] y agregados laminares con una alta porosidad; todo lo cual coincide con la caracterización inicial del suelo. Al aditivar el suelo arcilloso con los productos químicos, se genera un cambio en la apariencia de las partículas. En las imágenes correspondientes a los materiales aditivados se observan partículas más compactas, de menos porosidad, con una matriz más sólida y estable. Evidentemente, los aditivos líquidos funcionan como una especie de ligante entre las partículas del suelo y actúan mediante mecanismos que conducen a la liberación del agua atrapada en el suelo, con lo cual se generan materiales más densos.



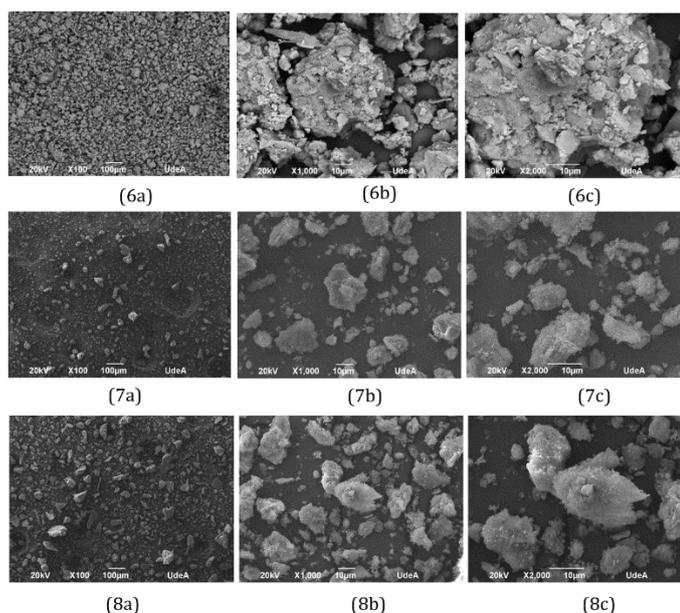


Figura 4. Imágenes SEM obtenidas para los sistemas de suelo aditivado. 1: suelo natural, 2: suelo + aceite sulfonado, 3: suelo + polímero, 4: Suelo + enzima, 5: suelo + organosilano, 6: suelo + cal, 7: suelo + cemento, 8: suelo + zeolita

3.9 Potencial de Hidrógeno pH, Conductividad Eléctrico y Capacidad de Intercambio Catiónico CIC

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para las pruebas de pH, conductividad y capacidad de intercambio catiónico de los materiales evaluados. Inicialmente se observa que los resultados de pH y conductividad presentan tendencias contrarias en los resultados obtenidos para los aditivos líquidos: aceite sulfonado, polímero, enzima y organosilano respecto a los obtenidos con los aditivos sólidos de naturaleza puzolánica: cal, cemento y zeolita.

Tabla 7. Resultados de pH, Conductividad y Capacidad de Intercambio Catiónico para los sistemas de suelo aditivado

Material	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CIC (meq/100g suelo seco)
Suelo Natural	4.88	215.0	20.88
Suelo + Aceite Sulfonado	5.00	214.0	18.32
Suelo + Polímero	4.84	202.6	16.52
Suelo + Enzima	4.91	207.5	17.16
Suelo + Organosilano	4.08	213.5	17.74
Suelo + Cal	12.31	6150.0	17.73
Suelo + Cemento	11.96	744.0	22.53
Suelo + Zeolita	11.87	1540.0	25.06

En el caso de los aditivos líquidos, los resultados de las mediciones de pH muestran que las características ácidas del suelo natural se mantienen al ser incorporados los productos, en algunos casos con una ligera tendencia a la generación de mayor acidez, hecho atribuible al carácter ácido de estos productos; Adicionalmente, los resultados obtenidos para la conductividad demuestran que estos productos químicos originan una disminución de la actividad eléctrica de los iones que son característicos de las partículas que están presentes en suelos arcillosos, lo que se traduce en una disminución del potencial Z del sistema.

Se evidencia además que estos aditivos son precursores de una serie de reacciones de intercambio catiónico con las partículas arcillosas del suelo que generan el desplazamiento del agua intersticial y las sales disueltas en ella [25]. Ello conduce a una mayor estabilidad química del sistema lo que se corrobora con la reducción generada en la capacidad de intercambio catiónico del suelo natural.

Para el caso de los productos sólidos, se presenta un pH fuertemente básico y una conductividad eléctrica que es significativamente mayor al del suelo; este medio altamente alcalino favorece las reacciones puzolánicas que, a su vez, generan un incremento en la conductividad eléctrica [26]. No obstante, estos sistemas tienden a la neutralidad en el tiempo a causa de los procesos de curado [27, 28].

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mostraron un buen desempeño de los sistemas aditivados al presentar mejoras en las propiedades de resistencia mecánicas respecto al suelo original, destacándose los productos de naturaleza puzolánica. Sin embargo, en el diseño de la estabilización de un suelo la elección de la solución más óptima dependerá siempre de las variaciones que se espera lograr con respecto a la característica geotécnica requerida del suelo y el uso que se pretenda dar, es decir al propósito buscado con la estabilización para la mejora de una vía en particular.

Mediante la caracterización fisicoquímica de los suelos tratados con los aditivos químicos, se pudieron evidenciar cambios morfológicos y texturales respecto al suelo sin aditivar, que indican mejoras significativas en las propiedades ingenieriles del suelo estudiado. Adicionalmente, para los materiales tratados con los aditivos líquidos se obtuvo una disminución de la conductividad eléctrica y el CIC respecto al suelo, lo cual evidencia la generación de reacciones de intercambio catiónico con el suelo arcilloso.

Los resultados obtenidos en la evaluación de las variables fisicoquímicas pH, Conductividad y CIC para los productos de naturaleza puzolánica, demuestran que se genera un medio favorable para la formación de productos cementantes, lo cual también explica las mejoras significativas en las propiedades mecánicas obtenidas para estos materiales.

El monitoreo y seguimiento de los materiales aditivados por períodos de tiempo más largos, pueden ser de gran utilidad para dar cuenta de la durabilidad que pueden presentar tanto los productos estabilizantes como los sistemas aditivados, evidenciando interacciones químicas a largo plazo que generen cambios en las propiedades del suelo tratado, al igual que modificaciones en su desempeño mecánico. Adicionalmente, sería importante realizar evaluaciones ambientales para determinar los posibles impactos sobre la biodiversidad que puedan estar asociados al uso de estabilizantes químicos

Los resultados presentados en este trabajo están asociados a la necesidad de profundizar en el conocimiento de los fenómenos tanto físicos como químicos presentes en los procesos de estabilización química; así como a la determinación de correlaciones existentes entre la respuesta mecánica y las propiedades fisicoquímicas de los materiales estudiados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia y al grupo de investigación Procesos Fisicoquímicos Aplicados por el apoyo para llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Nicholson, P. (2015). Chapter 11 - Admixture Soil Improvement. En. P. Nicholson (Eds.), *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. (pp. 231-288). Butterworth-Heinemann.
- [2] Petry, T. y Little, D. (2002). Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures—History, Practice, and Future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 447–460.
- [3] Al-Khanbashi, A. y El-Gamal, M. (2003). Modification of sandy soil using water-borne polymer. *Journal of Applied Polymer Science*, 88(10), 2484–2491.
- [4] Zhou, C. et al. (2019). Study on the Stabilization Mechanisms of Clayey Slope Surfaces Treated by Spraying with a New Soil Additive. *Applied Sciences*, 9(6), 1245.
- [5] Rezaeimalek, S., Huang, J. y Bin, S. (2017). Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization. *Construction and Building Materials*, 67, 210–220.
- [6] Cuipal, B. (2018). Estabilización de la subrasante de suelo arcilloso con uso de polímero sintético en la carretera Chachapoyas – Huancas, Amazonas. Trabajo de Grado. Universidad César Vallejo.
- [7] Khan, T. y Taha, M. (2015). Effect of Three Bioenzymes on Compaction, Consistency Limits, and Strength Characteristics of a Sedimentary Residual Soil. *Advances in Materials Science and Engineering*, 89, 1–9.
- [8] AbouKhadra, A., Zidan, A. y Gaber, Y. (2018). Experimental evaluation of strength characteristics of different Egyptian soils using enzymatic stabilizers. *Cogent Engineering*, 5(1), 1–11.
- [9] Kushwaha, S. et al. (2018). Stabilization of Red mud using eko soil enzyme for highway embankment. *Materials Today*, 5, 20500–20512.
- [10] Camacho, J., Reyes, Ó. y Mayorga, C. (2008). Curado natural y acelerado de una arcilla estabilizada con aceite sulfonado. *Ingeniería y Desarrollo*, 24, 48–62.
- [11] Soltani, A. et al. (2019). A sulphonated oil for stabilisation of expansive soils. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(11), 1285–1298.
- [12] Colmenares, G. (2015). Desarrollo de estabilizantes de suelos para la construcción de infraestructura vial a partir de subproductos de la explotación minera. Trabajo de Grado. Universidad de Antioquia.
- [13] Jerez, L., Gómez, O. y Murillo, C. (2018). Stabilization of Colombian lateritic soil with a hydrophobic compound (organosilane). *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(6), 639–646.
- [14] Corzo, C. (2013). Evaluación de las reacciones de hidratación y puzolánica del cemento portland con incorporación de puzolana natural y cal mediante termogravimetría y microscopía electrónica de barrido. Trabajo de Grado. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [15] Bauzá, J. (2003). Mezclas con cemento en las infraestructuras del transporte. Estabilización de suelos con cal. Omega.
- [16] Jayanthi, P. y Singh, D. (2016). *Advances in Civil Engineering Materials. Utilization of Sustainable Materials for Soil Stabilization: State-of-the-Art*. ASTM International, 5(1), 45-79.
- [17] Sharma, L. et al. (2017). Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study. *Applied Clay Science*, 152, 183–195.
- [18] Rodríguez, A. R. y del Castillo, H. (2009). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. Limusa.
- [19] Barbieri, D., Hoff, I. y Mai Britt, E. (2019). Organosilane and lignosulfonate as innovative stabilization techniques for crushed rocks used in road unbound layers. *Transportation Geotechnics*, 22, 1003-1008.
- [20] Gobernación de Antioquia. (2015). Informe final proyecto Estudio, selección y estructuración de sistemas tecnológicos alternativos para estabilización y tratamiento de la red vial secundaria departamental.

- [21] Soltani, H., Bagheri, M. y Amani, A. (2018). Use of hydrophilic polymeric stabilizer to improve strength and durability of fine-grained soils. *Cold Regions Science and Technology*, 23, 187–195.
- [22] Songt, K. y Sandí, G. (2001). Characterization of montmorillonite surfaces after modification by organosilane. *Clays and Clay Minerals*, 49(2), 119–125.
- [23] Yi-min, W. y Xiao-lan, L. (2011). Tests of ionic soil stabilizer reinforcing expansive soil. En *Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*. Hohhot, China.
- [24] Katz, L. et al. (2001). Mechanisms of Soil Stabilization with Liquid Ionic Stabilizer. *Transportation Research Record*, 1757(1), 50–57.
- [25] Zhao, H. et al. (2013). Effects of chemical stabilizers on an expansive clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18, 1–9.
- [26] Amini, O. y Ghasemi, M. (2019). Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil. *Construction and Building Materials*, 223, 409–420.
- [27] Taslimi, M. et al. (2020). Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of the cement-treated sandy soil. *Construction and Building Materials*, 239, 117-148
- [28] Salimi, M. y Ghorbani, A. (2019). Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers. *Applied Clay Science*, 184, 105-139.

La importancia de la composición química en los biocombustibles de aceite de colza y ricino en la generación de agua durante la combustión

Jorge Israel Noriega Lozano
Belén Alejandra Contreras Mendoza
Beatriz Romero Ángeles
Juan Carlos Paredes Rojas
Guillermo Urriolagoitia Sosa
Instituto Politécnico Nacional
México

La generación de energía ha sido una fuente para el desarrollo económico de los países por mucho tiempo, el consumo de combustibles fósiles ha aumentado cada vez más a un punto donde la demanda ya no se satisface. Dentro de las búsquedas por solucionar este problema se destacan los biocombustibles, hechos a partir de ciertos aceites vegetales o animales que poseen características similares a los combustibles fósiles como el diésel. Es llamado biodiésel a aquel producto que provenga de dichos aceites o grasas. La aplicación de estas nuevas formas para generar energía ha mostrado resultados favorables respecto a las emisiones de gases contaminantes que se generan durante la combustión. Sin embargo, surgen problemas en el sistema de inyección dado que los biocombustibles tienen un alto grado de viscosidad. La formación de mezclas de biodiésel con diésel muestran mejores resultados en el proceso de combustión. En este trabajo se determinó la importancia de la composición química que tiene el diésel y biodiésel hecho a base de aceite de colza y ricino. A partir del contenido de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Azufre se realizaron 4 tipos de mezclas (B0, B5, B10 y B100) para observar el comportamiento que presentan cada una de ellas. Mediante cálculos matemáticos se determinaron los volúmenes de combustión, se enfocó principalmente en la generación de agua durante la combustión, siendo el agua una gran fuente de calor. Posteriormente, se calculó la generación de entalpía en este proceso. Los resultados mostraron cambios considerables en el comportamiento de las mezclas de aceite de colza y ricino; se destaca el incremento en los volúmenes de vapor para el aceite de ricino al igual que su incremento en la generación de entalpía. Las razones principales son el aumento en la composición de Hidrógeno en el aceite de ricino y la disminución en el aceite de colza.

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de la energía a partir del siglo XIX ha jugado un papel importante para el ser humano debido a que es un factor importante para el crecimiento económico de un país. Se plantea que para el año 2040 se consumirá más del 50% de la energía consumida hoy en día, siendo la India y China los principales candidatos a suministrar la energía faltante [1]. Uno de los sectores que más consume energía es el industrial que abarca actividades de agricultura, minería, manufactura y construcción, este sector abarca el 52% del consumo mundial de energía. El segundo sector que consume más energía es el de transporte que abarca el 35% de consumo mundial de energía. La demanda de combustible por parte de este sector ha llegado a la producción de biocombustibles líquidos provenientes de aceites residuales caseros, aceites vegetales (proveniente de aceites de soya, canola, palma y colza), azúcares y grasas animales que se mezclan con combustibles fósiles. Se espera que para el año 2050 solo el 27% de la energía requerida será proveniente de biocombustibles [1].

Los problemas derivados de los combustibles fósiles como son los contaminantes emitidos por procesos de combustión y la falta cada vez mayor de este recurso ha llevado a la investigación de nuevas energías alternativas. Dentro de las nuevas opciones por reemplazar los combustibles fósiles se encuentra el biodiésel que destaca por contener un nivel pequeño de toxicidad aparte de ser biodegradable. Ofreciendo bajas emisiones de sulfatos, Azufres, monóxidos de Carbono, compuestos orgánicos volátiles, material particulado y nulos compuestos aromáticos, aunque su uso repercute en el desempeño del combustible y aumenta el dióxido de Carbono con base en el ciclo de producción.

El uso de biocombustibles en los motores de combustión ha mostrado fallas en la combustión, atribuido principalmente a su alto nivel de viscosidad de 35 a 40 Centipoise (cP) a una temperatura de 40°C que influye en la atomización del combustible. Además de este problema, el biocombustible genera gomas y depósitos de carbón dentro del motor. La solución de estos problemas radica en formar mezclas de biocombustibles con combustibles fósiles o el precalentamiento de la mezcla de atomización. La omisión de estos problemas provoca incrementos en el mantenimiento debido a un mayor desgaste y un decremento en la vida útil del motor diésel [1]. El crecimiento de la industria productora de biodiésel se ha visto en países europeos como Alemania, Francia, España e Italia, siendo líderes a nivel mundial en la producción de biodiésel a partir de aceite de girasol y colza. Otros países como Estados Unidos, Colombia, Malaysia e Indonesia también se encuentran como productores [1].

2. MARCO CONCEPTUAL

Desde el año 1900, Rudolf Diesel había empleado aceite vegetal generado a partir de aceite de maní como combustible en el motor de combustión interna que diseñó, aunque tuvieron que pasar 80 años después para que se volviera a utilizar este tipo de combustible [1]. La razón de este hecho radica en que los precios bajos que ofrecía el diésel fósil dentro del mercado originó el desplazamiento y el abandono del biodiésel dentro uso de la automoción [2]. Los motores de combustión interna ofrecen una alta durabilidad, bajo consumo de combustible y además un alto par del

motor. Las propiedades como la alta calidad, un alto poder lubricante, densidad energética, facilidad para vaporizarse, un elevado poder calorífico y un alto número de cetano son características que se deben tomar en cuenta para usar un combustible [3].

2.1 Biocombustibles

Este tipo de combustible proviene de grasas vegetales o animales, aceites naturales extraídos de colza o soja y de aceites usados en la industria alimenticia, lo que representa una segunda vida útil para este tipo de residuo. Los aceites o grasas que son recolectados se someten a un proceso de transesterificación donde se convierten en ésteres metílicos o etílicos provenientes de los ácidos grasos, la generación de este producto puede ser empleado como biodiésel completamente o usado en mezclas con diésel fósil. Durante la transesterificación también se obtiene glicerina [2].

- *Ventajas.* La aplicación de este tipo de combustibles representa ventajas y desventajas en los motores de combustión interna como [1, 2, 4]:
 - Disponibilidad.
 - Portabilidad.
 - Renovabilidad.
 - Mayor eficiencia de combustión.
 - Mayor biodegradabilidad.
 - No daña el medio ambiente
 - Contiene bajo contenido de Azufre.
 - No contiene benceno (sustancia cancerígena)
 - Reduce las emisiones contaminantes en forma gaseosa y líquida.
 - Mayor lubricidad.
 - Mayor número de cetano.
 - La generación de dióxido de Carbono (CO₂) es absorbido por las mismas plantas con que fue hecho el biocombustible.
- *Desventajas:*
 - Mayor viscosidad.
 - Menor contenido de energía.
 - Incremento en las emisiones de óxido de Nitrógeno.
 - Mayor desgaste en el motor.
 - Congelación del combustible a bajas temperaturas.
 - Degradación en condiciones de almacenamiento prolongados.
 - Obstrucción de los filtros: el biodiésel recoge suciedad de los ductos del combustible.
 - Mayor corrosión por el contenido de cloro, ácidos y sales.
 - Algunos tipos de biodiésel contienen alcoholes que descomponen el caucho.

2.2 Combustible Fósil

Debido a que el combustible no es como tal un producto manufacturado, presenta una variación en la mezcla de hidrocarburos donde contiene un cierto número de carbonos y configuraciones, por lo tanto, su composición no es exacta. Esta composición determina la relación estequiométrica y el poder calorífico inferior que posee según la procedencia del petróleo [3].

2.3 Composición de los combustibles

- *Contenido de Humedad:* la cantidad de agua de un combustible debe ser la menos posible debido a que disminuye las propiedades físicas del combustible y el poder calorífico, este poder disminuye cuando está en fase líquida. La presencia de humedad es destacada en combustibles sólidos como carbón y madera, aunque también en combustibles líquidos como alcoholes y aceites vegetales [5]. La presencia de agua puede provocar corrosión en el circuito de combustible, que puede generar hielo y reproducción de bacterias. El consumo del combustible por parte de las bacterias puede hacer que el diésel aumente su viscosidad y acidez. El agua es un líquido miscible [4].
- *Contenido de Carbono fijo:* se refiere a la cantidad de combustible en peso que no se evapora ni tampoco forma escoria, cenizas o humedad. La medición se realiza pesando el carbón al inicio y final de un ensayo normalizado. Existen diferentes formas de Carbón como turba, lignito, (usado en centrales eléctricas) que poseen un bajo poder calorífico debido a un alto nivel de humedad, seguidos de Carbones sub-bituminosos y bituminosos que tienen bajo nivel de humedad, pero altos niveles de Hidrógeno, elaborados a elevadas temperaturas y presiones. Este tipo de Carbón posee un alto poder calorífico. El carbón posee una baja temperatura de auto-inflamación [5].
- *Contenido de Oxígeno:* característico en combustibles procedentes de biomasa, éteres, aceites vegetales, ésteres y alcoholes. La mayor presencia de Oxígeno provoca que disminuya el poder calorífico y una mayor relación aire-

combustible. Esta molécula provoca que disminuya las emisiones de monóxido de Carbono (CO) pero aumenta el dióxido de Carbono (CO₂), produce menor cantidad de Nitrógeno, pero mayor cantidad de óxidos de Nitrógeno (NO_x) y reduce las cantidades de partículas e hidrocarburos sin quemar [5]. La molécula de Oxígeno posee una capacidad antidetonante, por lo que provoca un menor poder calorífico [3]. La presencia de mayor Oxígeno en la composición de biodiésel representa una reducción de hasta un 12% de poder calorífico respecto al diésel fósil. Por lo que las mezclas más comunes radican en 2% biodiésel y 98% diésel fósil (B2), 5% biodiésel y 95% diésel fósil (B5) y 20% biodiésel y 80% diésel fósil (B20) [1].

- *Contenido de Hidrógeno:* La presencia de este elemento es un factor que influye en el poder calorífico y aumentará cuando el hidrocarburo contenga mayor Hidrógeno. [3] Considerado como un vector energético debido a que cuando se produce guarda la energía que se le invirtió y después la libera cuando es consumida. Es considerado como el gas con mayor poder calorífico [5].

2.4 Características de los combustibles

Las inflamabilidad homogénea y progresiva son características que los combustibles en los motores diésel deben destacar como [4]:

- *Punto de inflamación:* se refiere a la temperatura en el que el combustible comienza a arder cuando se acerca una llama. El biodiésel tiene un mayor punto de inflamación respecto al diésel.
- *Punto de auto-inflamación:* se refiere a la temperatura mínima en la que el combustible arde de forma automática al juntarse con aire sin la presencia de un agente externo.
- *Poder de auto-inflamación:* medido a partir del índice de cetano que tiene el combustible, tal característica indica cuanta presión se puede ejercer en el combustible antes de auto inflamarse. Debe ser completa y rápida. Los combustibles actuales poseen un numero de cetano de 40-60. El número de cetano mayor a 51 es recomendable por los fabricantes, dado que reduce el ruido, el consumo de combustible, el retardo de encendido y mejora la eficiencia del combustible y el arranque en frio.
- *Viscosidad:* es un importante factor que influye en la forma de pulverización del combustible.
- *Volatilidad:* el diésel conforme se inyecta se va quemando y a los 200°C comienza a evaporarse.
- *Densidad:* regularmente se encuentran entre los valores de 820 y 845 kg/cm³ a temperatura de 15°C. El biodiésel posee mayor densidad que el diésel.
- *Poder calorífico:* se refiere a la cantidad de calor que se genera durante la reacción de combustible y el aire [9].

En la Tabla 1 se muestran comparadas algunas de las características del diésel y el biodiésel.

Tabla 1. Cuadro comparativo de Diésel y Biodiésel [6]

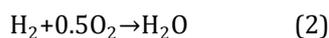
Características	Diésel	Biodiésel
Composición	HC (C10-C21)	FAME (C12-C22)
Viscosidad cinemática (mm ² /s) a 313 °K	1.9-4.1	1.9-6.0
Gravedad específica (g/mL)	0.85	0.88
Punto de Ignición (K)	333-353	373-443
Punto Nube (K)	258-278	270-285
Punto de Fluidez (K)	238-258	258-289
Numero de cetano	40-55	48-60
Humedad (vol.%)	0.05	0.05

2.5 Combustión

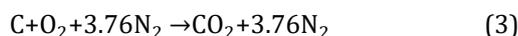
Para que exista la combustión debe existir un elemento que arda, es decir, el Hidrógeno y Carbono; componentes principales dentro de los combustibles. El otro elemento para que se inicie la combustión es el comburente que contiene Oxígeno (O₂) [7]. La combustión es una reacción química que libera luz y calor. Las mezclas de hidrocarburos líquidos constituyen el aceite pesado (combustible para motores diésel) que están generalmente formados por Oxígeno, Hidrógeno, Carbono y Azufre (en pequeñas cantidades). La presencia de Oxígeno en motores diésel, puede tener dos comportamientos, según se realice combustión completa o no, cuando se presenta la combustión completa se comporta de la siguiente manera la ecuación (1) [8].



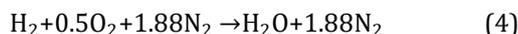
La combustión es un proceso a gran velocidad en el que se oxidan sus elementos. Esta ocurre cuando una sustancia pura reacciona con Oxígeno. La combinación de Oxígeno con Hidrógeno forma agua, la ecuación (2) química de esta reacción es [9].



Los productos finales que se obtienen de la combustión son dióxido de Carbono (CO₂) y agua (H₂O), si es que los elementos principales son parte de la mezcla original. Las ecuaciones anteriores son llamadas ecuaciones estequiométricas. La combustión que se realiza con Oxígeno puro es muy poco regular, debido a la disponibilidad y también se considera una sustancia peligrosa, por lo tanto, se hace con aire (mezcla de gases que contiene Nitrógeno). La modificación de esta sustancia cambia las ecuaciones estequiométricas anteriores y ahora queda de la siguiente forma la ecuación (3) para el Oxígeno [9].



Para el Hidrógeno la ecuación (4).



La presencia de Hidrógeno en la reacción provoca que absorba energía térmica de la combustión. La relación aire/combustible es un término que se usa en la combustión, como se muestra la siguiente ecuación (5) [9].

$$AF = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}} \quad (5)$$

En ocasiones, en los procesos reales cuando se suministra menos del 100% de relación AF, la mezcla es llamada rica, por lo que se considera que la combustión será incompleta. Si la relación es mayor al 100% se considera pobre y se interpreta que existe un exceso de aire. El ahorro de combustible se presenta con mezclas pobres [9].

2.6 Aceite de colza

La calidad que puede llegar a tener un biocombustible depende de la materia prima que fue empleado y la procedencia de fabricación [4]. La materia prima de este aceite es la colza, que pertenece a la familia de las crucíferas de raíz profunda y se puede encontrar un 44% de aceite en la semilla de colza, que contienen ácidos grasos de cadena larga [10]. El aceite de colza posee un color amarillo oscuro en estado bruto con altos contenidos de fosfátidos e impurezas, pero después de un proceso de refinado pasa a tener un color semejante al de los aceites de semillas con un olor a mostaza. El aceite tiene bajos niveles de saponificación, requiere bajas temperaturas para llegar a la solidificación y posee una mayor viscosidad que los aceites comunes [11]. La producción de este aceite es de los más rentables agrónomicamente en países de Europa. Los principales productores de Europa son Polonia, Rusia, Republica Checa, Francia y Alemania. Y a nivel mundial esta China, India, Estados Unidos y Canadá [10]. En la Tabla 2 se muestra la composición química que tiene el diésel fósil y el aceite de colza.

Tabla 2. Composición química del diésel fósil y el aceite de colza [6, 13]

Composición	Diésel Fósil	Aceite de colza
Carbono %	86.4	76.64
Hidrógeno %	13.6	10.8
Oxígeno %	0	11.92
Azufre %	0	0

2.7 Aceite de ricino

El ricino proviene de un arbusto de la familia de las Euforbiáceas originaria de India y África. Las semillas vienen contenidas sobre un racimo, tiene sustancias peligrosas y generadoras de alergias. Está compuesto de ácido graso del 87 a 91%, radical de hidroxilo que le permite mezclarse con alcoholes [12]. El aceite de ricino contiene una gran cantidad de hidroxilácidos e hidroxilos, la producción de este aceite es para fines medicinales e industriales, posee una alta densidad, es miscible y tiene una gran viscosidad [11]. Es usado en aplicaciones de aeronáutica y en máquinas pesadas. Es producido principalmente en Sudamérica, India y China [12]. En la Tabla 3 se muestra la composición química que tiene el diésel fósil y el aceite de ricino.

Tabla 3.- Composición química del diésel fósil y el aceite de ricino [6, 13]

Composición	Diésel Fósil	Aceite de ricino
Carbono %	86.4	73.41
Hidrógeno %	13.6	15.01
Oxígeno %	0	11.57
Azufre %	0	0

3. MÉTODO

3.1 Proceso de mezclado

En este trabajo se propone realizar de 4 tipos de mezclas con el motivo de observar el comportamiento de cada caso, usando las siguientes proporciones:

- 100%Diésel 0 % Biodiésel – (B0)
- 95% Diésel 5 % Biodiésel – (B5)
- 90% Diésel 10 % Biodiésel – (B10)
- 0% Diésel 100 % Biodiésel – (B100)

Para determinar la nueva composición química de cada elemento en la mezcla se utilizará la siguiente ecuación (6).

$$\% \text{ del elemento} = \frac{(\% \text{ Diésel}) (\% \text{ del elemento en Diésel})}{100} + \frac{(\% \text{ Biodiésel})(\% \text{ del elemento en Aceite})}{100} \quad (6)$$

3.2 Características termodinámicas

- *Condiciones de validación.* Para que determinar las características termodinámicas de los combustibles se basaran en condiciones donde la combustión se realiza completa, a una presión de 760 mm Hg y a una temperatura de 0°C. Los productos de combustión se harán para 1 kg de combustible [14].
- *Productos de combustión.* La cantidad teórica de aire que se necesita para quemar combustible líquido es representada por la ecuación (7) [14].

$$V^0 = 0.0889 (C + 0.375 S) + 0.265 H - 0.0333 O \left(\frac{m^3}{kg} \right) \quad (7)$$

Las variables de C, S, H y O representan el contenido del Carbono, Azufre, Hidrógeno y Oxígeno respectivamente, los valores de dichos elementos son cálculos previamente en el proceso de mezclado. El volumen teórico de los vapores que se generan en los productos de combustión es representado por la ecuación (8) [14].

$$V_{H_2O}^0 = 0.111 H + 0.0161 (V^0) \left(\frac{m^3}{kg} \right) \quad (8)$$

Un elevado valor de exceso de aire durante la combustión puede aumentar la generación de hollín, por la tanto, se utilizará el exceso de aire de 1.1 ($\alpha = 1.1$) [15]. Los volúmenes reales de vapor que se generan en la combustión considerando que $\alpha > 1$ se calculan mediante la ecuación (9) [14].

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0.0161 (\alpha - 1) V^0 \left(\frac{m^3}{kg} \right) \quad (9)$$

La entalpia (H) del agua que se produjo durante la combustión es calculada con base a los volúmenes anteriores y considerando que la reacción se hizo a presión constante (Cp) y a una temperatura en °C, como se expresa en la siguiente ecuación (10) [14].

$$H_{H_2O} = V_{H_2O} * Cp_{H_2O} * T \left(\frac{kJ}{kg} \right) \quad (10)$$

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Las fórmulas para calcular las mezclas, los volúmenes de combustión y la entalpia del agua se realizaron para el aceite de colza y ricino, tomando los valores iniciales de las Tablas 2 y 3. En las Tablas 4 y 5 se muestra los resultados de las mezclas propuestas.

Tabla 4. Composición de las nuevas mezclas usando aceite de colza

Contenido (%)	B0	B5	B10	B100
C	86.40	85.91	85.42	76.64
H	13.60	13.46	13.32	10.80
S	0.00	0.00	0.00	0.00
O	0.00	0.60	1.19	11.92

Tabla 5. Composición de las nuevas mezclas usando aceite de ricino

Contenido (%)	B0	B5	B10	B100
C	86.40	85.75	85.10	73.41
H	13.60	13.67	13.74	15.01
S	0.00	0.00	0.00	0.00
O	0.00	0.58	1.16	11.57

En las Tablas 6 y 7 se muestra los volúmenes de combustión de ambos aceites usando las 4 mezclas propuestas.

Tabla 6. Volumen de combustión para las mezclas de aceite de colza

Contenido (m ³ /kg)	B0	B5	B10	B100
V°	11.28	11.18	11.08	9.28
V _{H2O} °	1.69	1.67	1.66	1.35
V _{H2O}	1.71	1.69	1.67	1.36

Tabla 7. Volumen de combustión para las mezclas de aceite de ricino

Contenido (m ³ /kg)	B0	B5	B10	B100
V°	11.28	11.23	11.17	10.12
V _{H2O} °	1.69	1.70	1.71	1.83
V _{H2O}	1.71	1.72	1.72	1.85

Las Tablas 8 y 9 muestran las entalpías generadas por el agua en el proceso de combustión usando las diferentes mezclas propuestas, con $\alpha = 1.1$ variando las temperaturas.

Tabla 8. Entalpía del agua usando las mezclas de aceite de colza

Mezcla	B0	B0	B10	B100
Temperatura (°C)	Entalpia H2O (kJ/kg)	Entalpia H2O (kJ/kg)	Entalpia H2O (kJ/kg)	Entalpia H2O (kJ/kg)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
100	253.51	250.94	248.36	202.08
200	514.08	508.87	503.65	409.79
300	779.65	771.74	763.83	621.48
400	1053.67	1042.98	1032.30	839.92
500	1338.32	1324.74	1311.17	1066.82
600	1631.45	1614.90	1598.35	1300.48
700	1933.07	1913.47	1893.86	1540.92
800	2249.01	2226.19	2203.38	1792.76
900	2574.73	2548.62	2522.50	2052.40
1000	2903.26	2873.82	2844.37	2314.29
1100	3240.29	3207.42	3174.55	2582.94
1200	3585.80	3549.43	3513.06	2858.36
1300	3940.02	3900.06	3860.09	3140.72
1400	4302.53	4258.89	4215.25	3429.69
1500	4662.88	4615.58	4568.29	3716.94
1600	5041.66	4990.52	4939.38	4018.88
1700	5417.14	5362.20	5307.25	4318.19
1800	5799.43	5740.60	5681.77	4622.91
1900	6188.78	6126.00	6063.23	4933.28
2000	6585.54	6518.74	6451.94	5249.55
2100	6989.04	6918.15	6847.26	5571.20
2200	7383.99	7309.10	7234.20	5886.03
2300	7784.98	7706.02	7627.05	6205.67
2400	8191.25	8108.16	8025.07	6529.51
2500	8585.82	8498.73	8411.64	6844.04
2600	9002.69	8911.37	8820.06	7176.34
2700	9406.49	9311.07	9215.66	7498.22
2800	9834.43	9734.68	9634.92	7839.35

Tabla 9. Entalpía del agua usando las mezclas de aceite de ricino.

Mezcla	B0	B0	B10	B100
Temperatura (°C)	Entalpia H2O (kJ/kg)	Entalpia H2O (kJ/kg)	Entalpia H2O (kJ/kg)	Entalpia H2O (kJ/kg)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
100	253.51	254.54	255.57	274.15
200	514.08	516.18	518.27	555.95
300	779.65	782.82	786.00	843.14
400	1053.67	1057.96	1062.25	1139.48
500	1338.32	1343.77	1349.21	1447.30
600	1631.45	1638.09	1644.74	1764.31
700	1933.07	1940.95	1948.82	2090.49
800	2249.01	2258.16	2267.32	2432.16
900	2574.73	2585.22	2595.70	2784.41
1000	2903.26	2915.09	2926.91	3139.69
1100	3240.29	3253.48	3266.67	3504.16
1200	3585.80	3600.40	3615.00	3877.81
1300	3940.02	3956.07	3972.11	4260.88
1400	4302.53	4320.05	4337.57	4652.91
1500	4662.88	4681.87	4700.85	5042.60
1600	5041.66	5062.19	5082.72	5452.23
1700	5417.14	5439.20	5461.26	5858.29
1800	5799.43	5823.04	5846.65	6271.70

1900	6188.78	6213.98	6239.18	6692.76
2000	6585.54	6612.35	6639.17	7121.83
2100	6989.04	7017.50	7045.96	7558.20
2200	7383.99	7414.06	7444.13	7985.31
2300	7784.98	7816.68	7848.38	8418.95
2400	8191.25	8224.60	8257.95	8858.30
2500	8585.82	8620.78	8655.74	9285.01
2600	9002.69	9039.35	9076.00	9735.83
2700	9406.49	9444.79	9483.09	10172.51
2800	9834.43	9874.48	9914.52	10635.30

En las Figuras 1 y 2 se muestra los resultados de las Tablas 8 y 9.

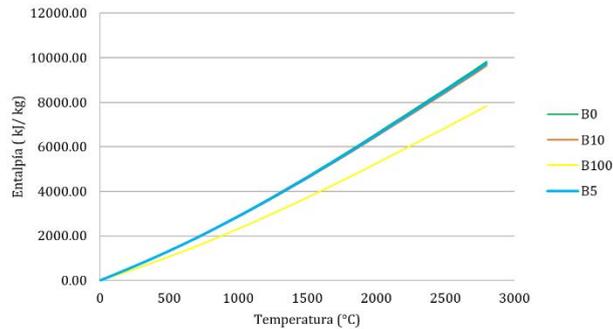


Figura 1. Gráfica de Temperatura-Entalpía de las mezclas B0, B5, B10 y B100 de aceite de colza

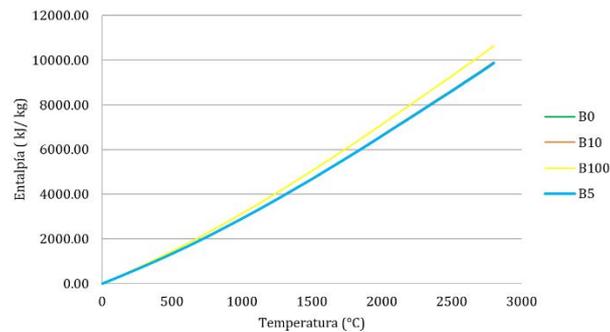


Figura 2. Gráfica de Temperatura-Entalpía de las mezclas B0, B5, B10, y B100 de aceite de ricino

5. CONCLUSIONES

La composición que presenta los combustibles que actualmente utilizamos varía según diferentes factores como la zona de extracción y el proceso para su obtención, en el caso del diésel fósil ya se presentan normas que regulan el comportamiento que pueden tener con el motivo de estandarizar su composición. La aplicación de dichas normas a nivel mundial está basada principalmente para un mayor aprovechamiento del combustible y reducir los efectos negativos que provocan sobre el medio ambiente. El uso de biocombustibles es una alternativa energética que se podría considerarse como nueva respecto al combustible fósil. La gran variedad de fuentes con las que se puede elaborar biocombustibles es una gran opción para su aplicación, además de que en estudios realizados previamente muestran la reducción de ciertos gases contaminantes. La utilización de biocombustibles hechos a partir de aceite de colza y ricino es una realidad en muchos países.

En este trabajo se observa la variación de la composición química que puede tener ambos aceites. Aunque pueden tener variaciones pequeñas en sus composiciones muestran diferentes resultados en algunos casos. La presencia de Azufre es una característica que los aceites y el diésel fósil comparten, reflejándose en una ventaja dado que las emisiones de gases de Azufre dañan el medio ambiente.

El proceso de mezclado se realizó como solución para hacer frente a las características físicas que poseen los biocombustibles y que representan problemas para el sistema de inyección. Las nuevas mezclas que se hicieron a partir de diésel fósil con ambos aceites mostraron un decremento en el contenido de Carbono. El aumento en el contenido de Hidrógeno se observó en el aceite de ricino, mientras que se redujo en el aceite de colza. La mayor presencia Hidrógeno muestra una elevación del poder calorífico que puede llegar a tener un combustible. El contenido de Oxígeno aumento tanto para el aceite de colza y ricino, lo que representa la disminución del poder calorífico del combustible y generación de mayor dióxido de Carbono.

La variación del Carbono, Hidrógeno y Oxígeno mostró diferentes resultados para los cálculos de volumen de combustión. La cantidad teórica de aire para quemar combustible disminuyó en ambas mezclas de aceites, atribuido

principalmente a la disminución de Carbono. El volumen teórico de los vapores mostró un aumento en las mezclas de ricino, generalmente dado al aumento de Hidrógeno en su composición y la disminución en el aceite de colza por la reducción de Hidrógeno en su contenido. Los volúmenes reales de vapor aumentaron principalmente en las mezclas de ricino por el incremento del volumen teórico de los vapores y se redujo en el aceite de colza por la disminución del volumen teórico de sus vapores.

La generación de entalpía durante el proceso de combustión es un factor importante dado que muestra el calor liberado o absorbido en una reacción química a presión constante [2]. La entalpía que genera el agua durante el proceso de combustión de ambos aceites incrementaba conforme aumento la temperatura. El comportamiento de la entalpía que mostró el aceite de colza fue en descenso, es decir, la mayor presencia de biodiésel dentro de la mezcla provocó que se generara menor cantidad de entalpía, siendo el diésel fósil el mayor generador de entalpía dentro de la combustión. El comportamiento de la entalpía para el aceite de ricino registro un incremento cuando se presentaba mayor contenido de biodiésel dentro de la mezcla, considerando que no aumento mucho su valor como en el aceite de colza, pero si se registró un cambio considerable en su comportamiento. De acuerdo con [4], el poder calorífico del Hidrógeno que se libera para formar agua durante la combustión es una de las mayores fuentes de calor durante este proceso, seguido de Carbono que forma dióxido de Carbono.

La importancia de la generación de agua durante el proceso de combustión muestra una gran fuente de calor que surge esta reacción química. El notable incremento de Hidrógeno en el aceite de ricino además de aportar mayor poder calorífico propicia la formación de agua a partir de la reacción con Oxígeno, que también en este aceite aumento. La razón de este comportamiento donde el aceite de ricino genera mayor poder calorífico que el de colza radica en que en ambos casos se presenta la reducción de contenido de Carbono respecto al diésel fósil, pero existe un incremento en el contenido de Hidrógeno para el aceite de ricino y un decremento en el aceite de colza, además de que ambos aceites hay aumento de Oxígeno respecto al diésel fósil. Por lo tanto, el Hidrógeno dentro de la composición de los combustibles juega un papel importante durante la combustión.

REFERENCIAS

- [1] Rincón, J. y Silva, E. (2015). Bioenergía: Fuentes, Conversión y Sustentabilidad. Corporación Ema.
- [2] Caselles, M. et al. (2015). Química Aplicada a la Ingeniería. UNED.
- [3] Alvarez, J. et al. (2002). Máquinas Térmicas Motoras. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [4] González, D. (2015). Motores Térmicos y Sus Sistemas Auxiliares. Paraninfo.
- [5] Muñoz, M. y Rovira, A. (2014). Máquinas Térmicas. UNED.
- [6] Lotero, E. et al. (2006). Catalysis. Royal Society of Chemistry.
- [7] Juárez, M. y Morales, M. (2015). Termodinámica Técnica. Paraninfo.
- [8] Kates, E. y Luck, W. (1982). Motores Diésel y de Gas de Alta Compresión. Reverte.
- [9] Rolle, K. (2006). Termodinámica. Pearson.
- [10] Sánchez, M. (2003). Procesos de elaboración de alimentos y bebidas. Mundi-Prensa Libros.
- [11] Bailey, A. (1961). Aceites y Grasas Industriales. Reverte.
- [12] Ganduglia, F. et al. (2009). Manual de Biocombustibles. ARPEL.
- [13] Castillo, K. y Jimeno, N. (2018). Caracterización teórica de parámetros del biodiésel y estudio de algunas de sus emisiones. Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Madrid.
- [14] López, G. et al. (2014). Cálculo de las características termodinámicas de los productos de la combustión del gas natural y del combustóleo. En Sexto Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. México, México.
- [15] Dietsche, K. y Klingebiel, M. (2005). Manual de la Técnica del Automóvil. Reverte.

DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA (Quinta Edición)

Los investigadores que escribieron cada uno de los capítulos en que se divide esta publicación provienen de Colombia, Perú, Argentina, Panamá, Ecuador, España, Brasil, México, Chile y Nicaragua, y contaron con el apoyo de instituciones donde la investigación es una cuestión estratégica. Esa sinergia entre talento humano, apoyo institucional e investigación es la que hace posible los descubrimientos, propuestas y desarrollos que el lector encontrará en las páginas siguientes.

Los capítulos denotan una estructura seria, organizada y científica, cuyo contenido ofrece una lectura amigable en disciplinas como las Ciencias Computacionales y las ingenierías de Minas, Ambiental, Naval, Industrial, Mecánica, Electrónica, Biomédica, Química, Civil, Aeronáutica, de Materiales y Mecatrónica. Como se puede observar, se trata de un trabajo de amplia cobertura y de un contenido maravilloso, que le aporta a la academia, la industria y a la ciencia en general gran parte del conocimiento que se necesita para continuar con el nivel de desarrollo que se ha alcanzado hasta el momento.

ISBN: 978-958-52333-4-8