

Tecnologías de IoT eficaces para una plataforma de agricultura 4.0¹

Effective IoT technologies for an agriculture 4.0 platform

Jhonatan Paolo Tovar Soto²
Carlos Francisco Pareja Figueredo³
Luis Carlos Gutiérrez Martínez⁴

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.31.8936>

RESUMEN

Este artículo presenta una selección de tecnologías eficaces del Internet de las cosas para un modelo de Agricultura 4.0, mediante un estadístico numérico. Primero, se recopiló información revisando las herramientas utilizadas en plataformas de monitoreo agrícola, luego se hizo una selección por medio de funciones de estimación de parámetros normalizados que proporcionan gráficos de agrupamiento, para determinar las que poseen mayor ventaja y son más útiles para la plataforma de Internet de las cosas. Los resultados de esta selección evidencian que las tecnologías de bajo costo, con menor consumo de energía y más fáciles de implementar son Sigfox, tarjeta TTGO y Raspberry Pi, y los lenguajes más utilizados son Java y Python. Por último, se definió un esquema de conexión para Agricultura 4.0, que puede ser útil para pequeños productores del campo.

Palabras claves: Agricultura digital, aplicaciones agrícolas, estadística descriptiva, Industria 4.0.

ABSTRACT

This paper presents a selection of effective Internet of Things technologies for an agriculture 4.0 model by developing a numerical statistician. The information has been collected through a review of the tools that are used in agricultural monitoring platforms and subsequently, a selection has been made through standardized parameter estimation functions that provide clustering plots in order to determine those that have the greatest advantage and are most useful for the Internet of Things platform. Then, the results revealed that the low-cost technologies with the lowest power consumption and simplest to implement are: Sigfox, TTGO board and Raspberry Pi, and programming languages such as Java or Python. Finally, a scheme for agriculture 4.0 was defined, which can be useful for small-scale producers in the farm sector.

Keywords: Digital agriculture, agricultural applications, descriptive statistics, industry 4.0.



Cómo citar este artículo: J. P. Tovar, C. F. Pareja and L. F. Gutiérrez. "Tecnologías de IoT eficaces para una plataforma de agricultura 4.0". *Ingeniare*, vol. 17, no. 31, pp. 33-48, Diciembre 2021.

¹ Artículo derivado del proyecto de investigación titulado "Aplicación de un desarrollo IoT con técnicas de agricultura de precisión para un cultivo de flores", del grupo de investigación EIDOS, línea de investigación Desarrollo Tecnológico Sanjoseísta. Investigador principal Jhonatan Paolo Tovar Soto.

² Magíster en Ingeniería, Automatización Industrial, Ingeniero electrónico. Fundación de Educación Superior San José y Universidad de San Buenaventura. jtovar@usanjose.edu.co, jtovar@usbbog.edu.co. Grupo de investigación Eidos y Solsytec.

³ Especialista en Mercadeo, Ingeniero industrial. Fundación de Educación Superior San José. capareja@gmail.com. Grupo de investigación Eidos.

⁴ Doctor en Educación, Magíster en Innovación, Ingeniero de sistemas. Fundación de Educación Superior San José. lcm95@gmail.com. Grupo de investigación Eidos.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto Agricultura 4.0 se define como la implementación de estrategias para reducir el consumo de agua, fertilizantes y pesticidas, con el fin de mejorar los procesos de producción de los cultivos, utilizando elementos de la agricultura de precisión, automatización y robótica agrícola, así como técnicas de *Big Data* e inteligencia artificial [1].

En ese sentido, este concepto busca consolidarse para encontrar nuevas estrategias de implementación de tecnologías en los procesos agrícolas, en gran medida por la creciente necesidad de fortalecer tareas del campo con herramientas de la era digital [2]. En el caso colombiano, se hace necesario poner en práctica proyectos de innovación tecnológica en el campo, debido a que existe una brecha digital y una problemática estructural asociadas a dificultades en el acceso a vías de comunicación y bienes públicos que imposibilitan el desarrollo rural [3]. Por esta razón, es importante incentivar la alfabetización electrónica y el acceso a las herramientas digitales para mejorar la productividad de los pequeños productores y de las zonas rurales marginadas [4].

Con base en lo anterior, se propone una metodología para seleccionar las tecnologías que posibiliten implementar aplicaciones con Internet de las cosas (IoT) y que responda a las necesidades de los pequeños productores del campo, con el fin de potencializar la agricultura digital y el desarrollo rural.

2. METODOLOGÍA

El trabajo parte de una investigación cuantitativa de tipo aplicado para realizar un análisis estadístico [5] en el que se diferencia tres fases:

- *Fase 1.* Establecer el estado del arte y las tecnologías de IoT en aplicaciones agrícolas.
- *Fase 2.* Definir parámetros de evaluación, funciones de estimación normalizadas, probabilidades conjuntas y tablas de datos.
- *Fase 3.* Analizar agrupamientos de acuerdo con los criterios definidos para la selección de las tecnologías, identificando las que tienen mayores ventajas. Propuesta de un modelo de plataforma de Agricultura 4.0 con los resultados del análisis.

2.1 Fase 1

El estado del arte parte de la indagación a través de diversos motores de búsqueda (IEEEExplore, Google Scholar, Springer, Scielo), en los que se discriminaron artículos mediante los operadores lógicos AND y OR, con las siguientes palabras: Agricultura 4.0, Internet de las cosas, aplicaciones agrícolas, Industria

4.0, plataformas de monitoreo, agricultura digital, herramientas de uso libre. Así mismo, las publicaciones se limitaron a los últimos cinco años. A continuación, se presentan los artículos encontrados en el estado del arte para el presente estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Documentos encontrados para el análisis de las tecnologías

Documentos encontrados
[1], [6], [15]–[23], [7]–[14], [2], [24], [25]

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Fase 2

La selección partió de un conjunto de parámetros para identificar las ventajas y desventajas de las tecnologías IoT, establecidos a partir de la información del estado del arte. Los trabajos encontrados diferencian en su gran mayoría una arquitectura para las plataformas IoT en agricultura, en las que se diferencian tres capas: percepción, red e implementación [22].

A partir de esto se distinguieron cuatro tecnologías en dos capas (percepción y red), que se tomaron como base para discriminar los parámetros. Las tecnologías definidas son: tarjetas de desarrollo, placas de tamaño reducido, protocolos de comunicación y *software*. De estos cuatro elementos se diferenciaron los siguientes parámetros para evaluar su rendimiento y ventajas:

- *Tarjetas de desarrollo (TD)*. Consumo energético (CE), memoria (M), tamaño (T), facilidad de programación (FP), costo (C), procesamiento de datos (PD).
- *Placas de tamaño reducido (PTR)*. Consumo energético (CE), memoria (M), tamaño (T), costo (C), velocidad de procesamiento (VP), cantidad de periféricos que puede utilizar (CP).
- *Protocolos de comunicación (PC)*. Volumen de envío de información (VEI), consumo energético (CE), nodos de conexión (NC), costo (C), radio de alcance (RA).
- *Software (S)*. Facilidad de uso del lenguaje (FUL), conexión a la nube (CN), recurrencia de uso (RU)./

Con base en lo anterior se definieron unas funciones parametrizadas, diferenciando tres posibles relaciones: lineal, exponencial y parte entera. Estas relaciones surgen del análisis de los valores o puntajes asociados a los parámetros, en los que en algunos casos no fue posible evaluar las puntuaciones de manera proporcional, por lo cual se definieron comportamientos exponenciales. En otros casos las ponderaciones se asignaron con valores cualitativos, cuya dependencia es exclusiva de una puntuación subjetiva, razón por la cual sólo es posible relacionar con un valor de 0 a 10 (donde 0 indica que no tiene ventajas y 10 que tiene la mayor ventaja respecto a otras tecnologías).

Por otra parte, para identificar el tipo de función (F) que corresponde a cada parámetro (P) de los cuatro grupos se elaboró una tabla (Tabla 2), discriminando cada característica por tecnología (T). Las funciones que fueron distinguidas se dividieron entre lineal (L), exponencial (E) y parte entera (PE).

Tabla 2. Clasificación de parámetros según el tipo de función

T	P	F	T	P	F
TD	CE	L	PTR	CE	L
	M	E		M	E
	T	L		T	L
	FP	PE		C	L
	C	L		VP	L
	PD	E		CP	L
PC	VEI	E	S	FUL	PE
	CE	E		CN	PE
	NC	E		RU	PE
	C	PE			
	RA	L			

Fuente: Elaboración propia.

La función lineal corresponde a la ecuación 1.

$$p(P) = mP + \Delta P \quad (1)$$

Donde $P \in \mathbb{Z} : 0 < P$ corresponde al valor asociado al parámetro que cumple las condiciones para ser evaluado con la función lineal (proporcionalidad y un error asociado ΔP).

La función exponencial se detalla en la ecuación 2.

$$p(P) = \frac{10^{A(P)}}{10} \quad (2)$$

Donde

$$A(P) = \begin{cases} P & \text{si es relación directa} \\ \frac{1}{P} & \text{si es relación inversa} \end{cases}$$

En esta función se tiene que $P \in \mathbb{Z} : 0 < P \leq 1$ y corresponde al valor asociado al parámetro que cumple las condiciones para ser evaluado con la función exponencial.

Por último, la función parte entera se describe en la ecuación 3.

$$p(P) = \frac{\lfloor P \rfloor}{10} \quad (3)$$

Donde $P \in \mathbb{Z} : 0 < P \leq 10$ corresponde al valor asociado al parámetro que cumple las condiciones para ser evaluado con la función parte entera (evaluación cualitativa del parámetro).

2.3 Fase 3

Una vez estimados todos los parámetros y sus probabilidades asociadas se generaron las tablas para cada grupo de tecnologías y se graficaron los resultados mediante el uso de agrupamientos, con el fin de identificar las tecnologías con los mejores puntajes. El criterio de rechazo-inclusión se fundamentó en la comparación de la probabilidad del parámetro $p(P)$ y la probabilidad conjunta de las demás características $p(OC_X)$, en el que el subíndice X corresponde al parámetro asociado de comparación P.

Así mismo, como cada parámetro tiene un peso diferente al momento de seleccionar las tecnologías para aplicaciones IoT se estableció un promedio ponderado para estimar $p(OC_X)$, asignando un peso a cada probabilidad (m_i). En la ecuación 4 se observa la función de promedio ponderado.

$$p(OC_X) = m_1p(P_1) + m_2p(P_2) \dots + m_i p(P_i) \quad (4)$$

En la siguiente tabla se observa un ejemplo de cálculo de las probabilidades para el parámetro CE de la tecnología TD (Tabla 3). Finalmente, y de acuerdo con los resultados obtenidos de las probabilidades conjuntas y el análisis de agrupamientos, se define el esquema de Agricultura 4.0, identificando la relación entre sus componentes.

Tabla 3. Probabilidades para los agrupamientos en el caso de comparación entre el parámetro CE vs. OC

Parámetro	Valor
CE	$p(CE)$
OC_X	$p(OC_X) = m_M p(M) + m_T p(T) + m_{FP} p(FP) + m_C p(C) + m_{PD} p(PD)$

Fuente: Elaboración propia.

3. RESULTADOS

A través de la búsqueda documental se identificaron las tecnologías para los cuatro grupos (Tabla 4). De esta información se evidencia lo siguiente: 11 tarjetas de desarrollo ampliamente utilizadas en el paradigma IoT, 8 protocolos de comunicación entre los tradicionales y alternos, 5 lenguajes de programación que los autores recomiendan o utilizan en las aplicaciones de IoT y, por último, 4 placas de tamaño

reducido. Adicionalmente, para el análisis de los agrupamientos cada tecnología tiene un índice (I) que la identifica, como se indica en la siguiente tabla (Tabla 4).

Por último, y con base en la Tabla 1, se aplicaron las funciones asociadas a cada parámetro y se calculó la probabilidad de cada uno, como se mostró en la Tabla 3.

Tabla 4. Tecnologías documentadas e índices para su identificación

TD	I	PC	I
Arduino	TD1	ZigBee	PC1
TTGO	TD2	WiFi	PC2
Teensy	TD3	Bluetooth	PC3
MSP432	TD4	Red móvil	PC4
Particle	TD5	Neul	PC5
Sparkfun Things	TD6	LoRaWAN	PC6
Adafruit Feather	TD7	NFC	PC7
STM32 Discovery	TD8	Sigfox	PC8
Silicon Labs	TD9		
Microchip	TD10		
NodeMCU	TD11		
S	I	PTR	I
Python	S1	Raspberry Pi	PTR1
Java	S2	BeagleBone	PTR2
JavaScript	S3	PcDuino	PTR3
C	S4	PandaBoard	PTR4
PHP	S5		

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Análisis del grupo TD

Con los datos obtenidos de la Tabla 5 se realizaron los 6 agrupamientos que se presentan en las Figuras 1 a 6. Se observa que la TD con mayor ventaja es la más cercana a la coordenada (1,1) en los diferentes agrupamientos.

Tabla 5. Ponderaciones para los agrupamientos del grupo TD

I	$p(CE)$	$p(OC_{CE})$	$p(M)$	$p(OC_M)$	$p(T)$	$p(OC_T)$	$p(FP)$	$p(OC_{FP})$	$p(C)$	$p(OC_C)$	$p(PD)$	$p(OC_{PD})$
TD1	0,33	0,55	0,20	0,53	0,56	0,49	1,00	0,47	0,64	0,41	0,32	0,51
TD2	0,70	0,90	0,80	0,86	0,91	0,85	1,00	0,85	0,98	0,78	0,68	0,87
TD3	0,57	0,85	1,00	0,75	0,98	0,75	1,00	0,77	0,77	0,78	0,68	0,79
TD4	1,00	0,55	0,40	0,69	0,05	0,78	0,00	0,69	0,84	0,56	0,68	0,66
TD5	0,56	0,80	0,63	0,75	1,00	0,70	1,00	0,72	0,76	0,72	0,68	0,74

I	$p(CE)$	$p(OC_{CE})$	$p(M)$	$p(OC_M)$	$p(T)$	$p(OC_T)$	$p(FP)$	$p(OC_{FP})$	$p(C)$	$p(OC_C)$	$p(PD)$	$p(OC_{PD})$
TD6	0,37	0,85	0,80	0,72	0,98	0,70	1,00	0,71	0,83	0,67	0,68	0,73
TD7	0,05	0,77	0,05	0,65	1,00	0,53	1,00	0,57	0,87	0,44	0,68	0,58
TD8	0,45	0,62	0,36	0,60	0,34	0,63	0,00	0,61	0,88	0,41	0,68	0,56
TD9	0,64	0,24	0,32	0,34	0,26	0,37	0,50	0,33	0,05	0,50	0,68	0,30
TD10	0,82	0,43	0,32	0,55	0,45	0,55	0,00	0,56	0,45	0,57	0,68	0,51
TD11	0,57	0,87	0,40	0,84	0,94	0,78	1,00	0,78	1,00	0,68	0,68	0,80

Fuente: Elaboración propia.

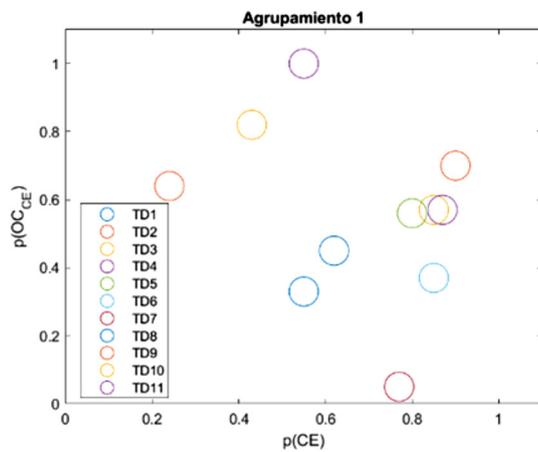


Figura 1. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro CE y

Fuente: Elaboración propia.

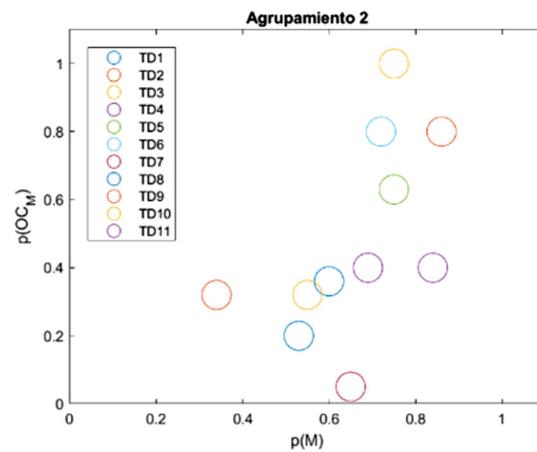


Figura 2. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro M y

Fuente: Elaboración propia.

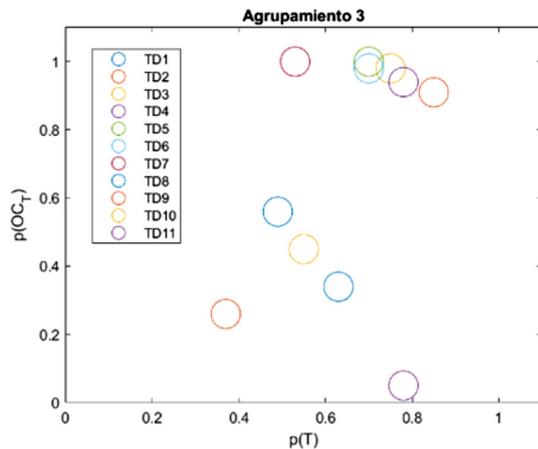


Figura 3. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro T y

Fuente: Elaboración propia.

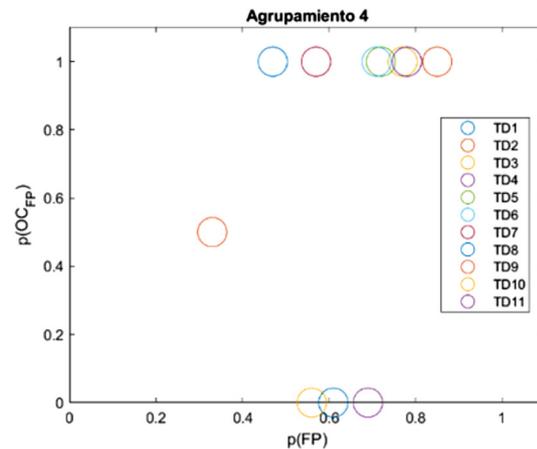


Figura 4. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro FP y

Fuente: Elaboración propia.

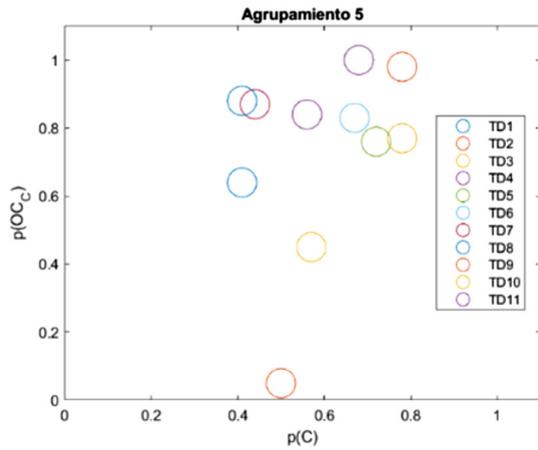


Figura 5. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro C y

Fuente: Elaboración propia.

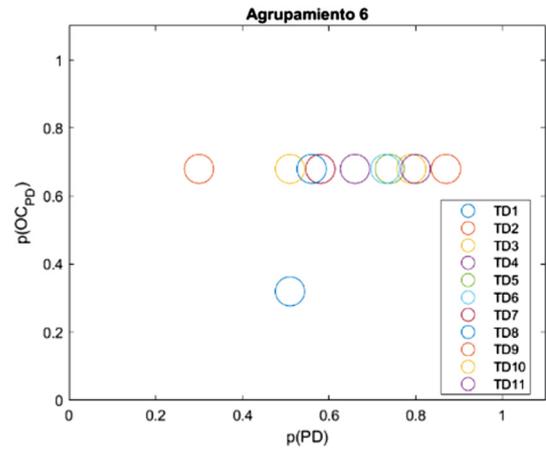


Figura 6. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro PD y

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Análisis del grupo PC

Con los datos de la Tabla 6 se realizaron los 5 agrupamientos que se observan en las Figuras 7 a 11. Se puede observar que el PC con mayor ventaja es el más cercano a la coordenada (1,1) en los diferentes agrupamientos.

Tabla 6. Ponderaciones para los agrupamientos del grupo PC

I	$p(VEI)$	$p(OC_{VEI})$	$p(CE)$	$p(OC_{CE})$	$p(NC)$	$p(OC_{NC})$	$p(C)$	$p(OC_C)$	$p(RA)$	$p(OC_{RA})$
PC1	0,28	0,49	0,22	0,38	0,87	0,40	1,00	0,29	0,06	0,65
PC2	0,95	0,07	0,17	0,14	0,29	0,17	0,00	0,25	0,05	0,25
PC3	0,36	0,51	0,27	0,39	0,76	0,42	1,00	0,29	0,05	0,65
PC4	0,55	0,26	0,29	0,24	1,00	0,28	0,00	0,52	0,43	0,37
PC5	0,23	0,64	0,74	0,43	0,10	0,58	1,00	0,34	0,24	0,62
PC6	0,21	0,57	0,23	0,47	0,39	0,49	1,00	0,30	0,33	0,53
PC7	0,30	0,47	0,24	0,37	0,10	0,40	1,00	0,15	0,05	0,49
PC8	0,10	0,81	1,00	0,56	1,00	0,75	0,50	0,88	1,00	0,69

Fuente: Elaboración propia.

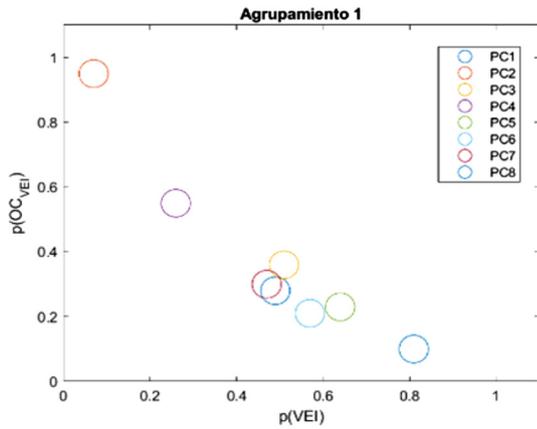


Figura 7. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro VEI y

Fuente: Elaboración propia.

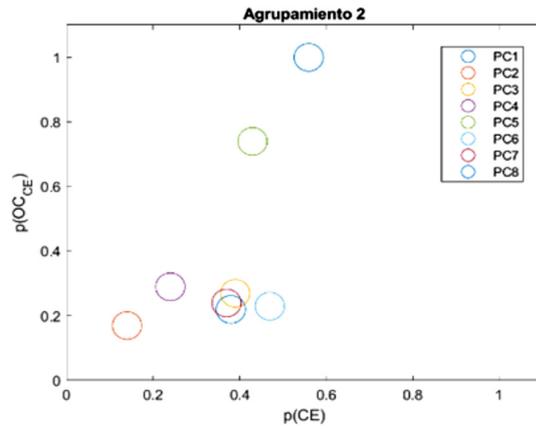


Figura 8. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro CE y

Fuente: Elaboración propia.

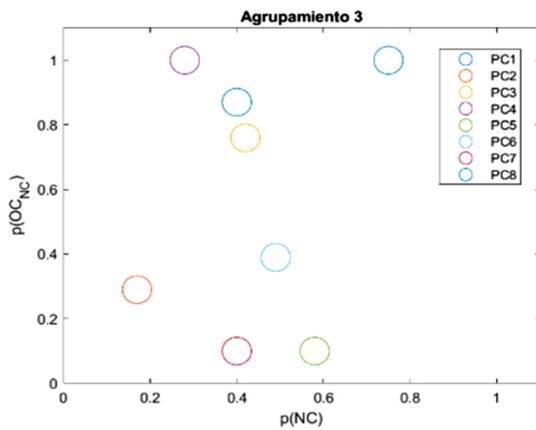


Figura 9. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro NC y

Fuente: Elaboración propia.

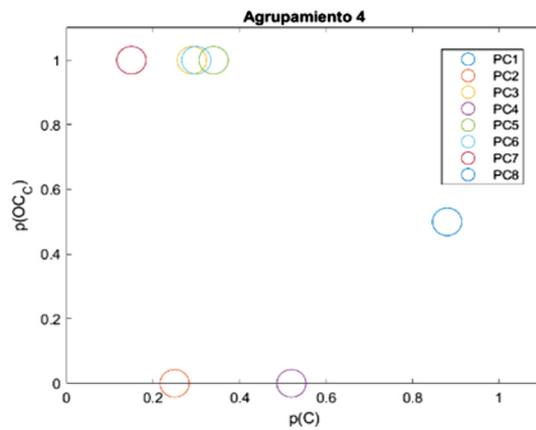


Figura 10. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro C y

Fuente: Elaboración propia.

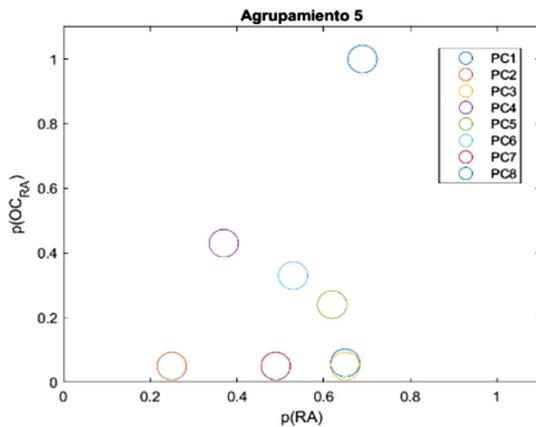


Figura 11. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro RA y

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Análisis del grupo S

Con los datos de la Tabla 7 se realizaron los 3 agrupamientos que se observan en las Figuras 12 a 14. De este análisis se observa que el PC con mayor ventaja es el más cercano a la coordenada (1,1) en los diferentes agrupamientos.

Tabla 7. Ponderaciones para los agrupamientos del grupo S

I	$p(FUL)$	$p(OC_{FUL})$	$p(CN)$	$p(OC_{CN})$	$p(RU)$	$p(OC_{RU})$
S1	1,00	0,80	0,70	1,00	1,00	0,85
S2	1,00	0,80	0,90	0,87	0,60	0,95
S3	0,80	0,67	0,80	0,67	0,40	0,80
S4	0,70	0,07	0,00	0,53	0,20	0,35
S5	0,80	0,47	0,60	0,60	0,20	0,70

Fuente: elaboración propia.

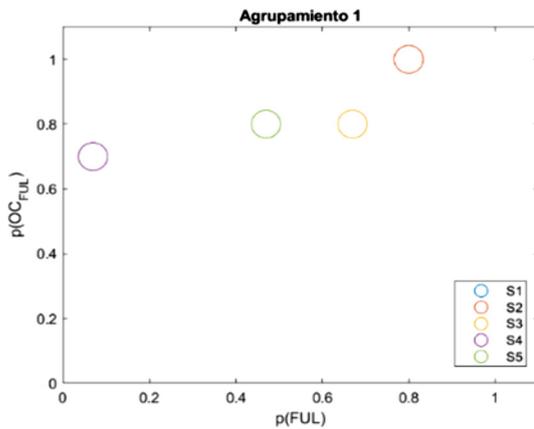


Figura 12. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro FUL y

Fuente: Elaboración propia.

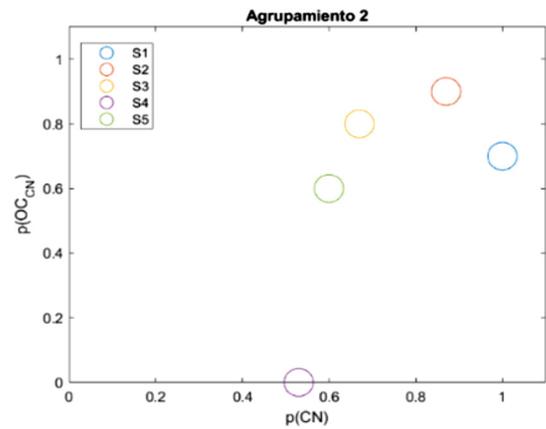


Figura 13. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro CN y

Fuente: Elaboración propia.

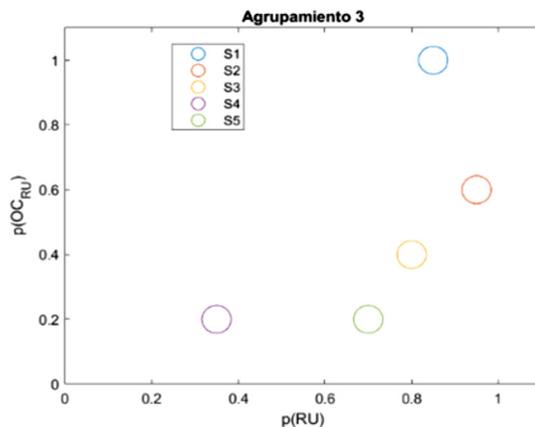


Figura 14. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro RU y

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Análisis del grupo PTR

Con base en los datos de la Tabla 8 se realizaron los 6 agrupamientos que se observan en las Figuras 15 a 20. Se observa que el PTR con mayor ventaja es el más cercano a la coordenada (1,1) en los diferentes agrupamientos.

Tabla 8. Ponderaciones para los agrupamientos del grupo PTR

I	$p(CE)$	$p(OC_{CE})$	$p(M)$	$p(OC_M)$	$p(T)$	$p(OC_T)$	$p(C)$	$p(OC_C)$	$p(VP)$	$p(OC_{VP})$	$p(CP)$	$p(OC_{CP})$
PTR1	0,40	0,89	0,99	0,91	0,97	0,80	0,78	0,84	1,00	0,80	1,00	0,79
PTR2	1,00	0,70	0,49	0,83	1,00	0,72	1,00	0,57	0,30	0,79	0,10	0,86
PTR3	0,70	0,59	0,58	0,68	0,55	0,61	0,76	0,50	0,30	0,64	0,36	0,65
PTR4	0,10	0,20	0,58	0,20	0,05	0,20	0,05	0,27	0,30	0,17	0,36	0,15

Fuente: Elaboración propia.

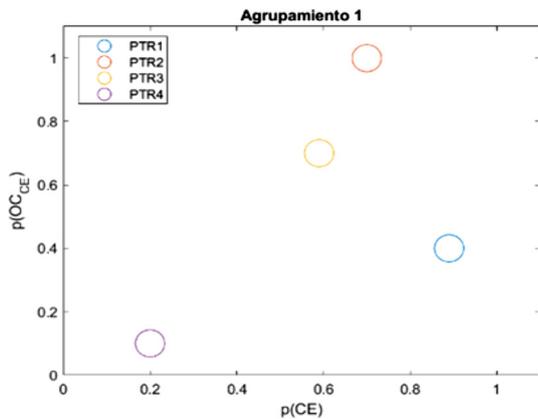


Figura 15. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro CE y

Fuente: Elaboración propia.

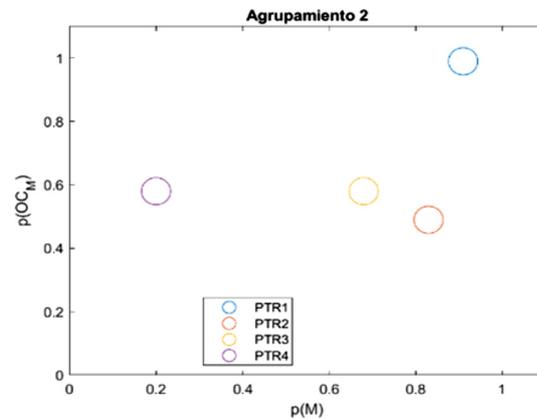


Figura 16. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro M y

Fuente: Elaboración propia.

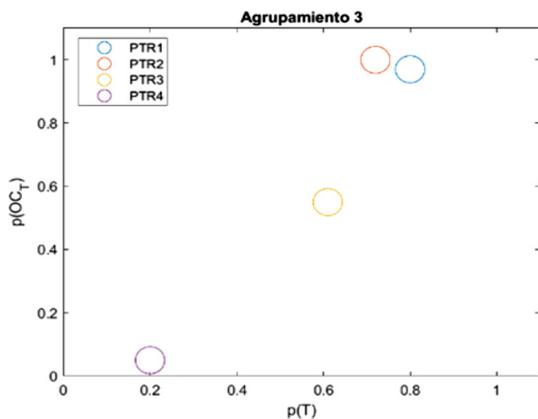


Figura 17. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro T y

Fuente: Elaboración propia.

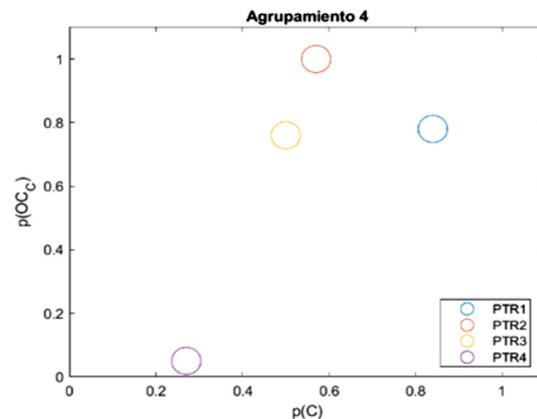


Figura 18. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro C y

Fuente: Elaboración propia.

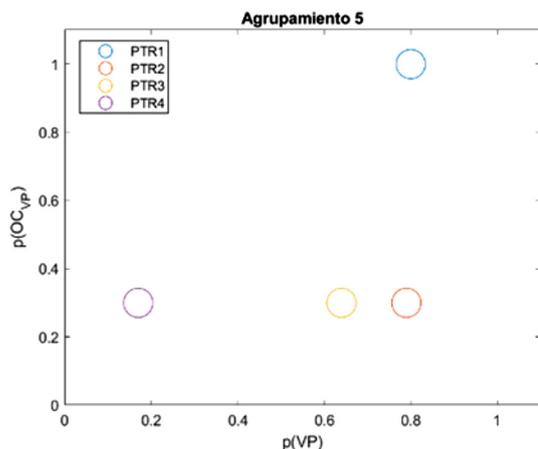


Figura 19. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro VP y

Fuente: Elaboración propia.

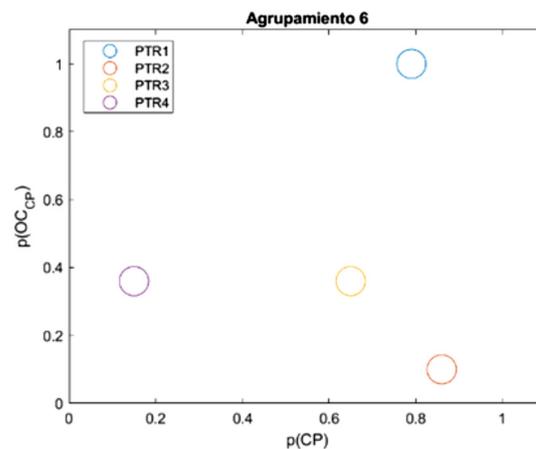


Figura 20. Agrupamiento de comparación de probabilidades de parámetro CP y

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Análisis de los resultados finales

Finalmente, se asignaron pesos ponderados a cada parámetro, de acuerdo con la experiencia previa y la información recolectada en la revisión del estado del arte. Se calculó la ponderación total de cada tipo de tecnología (Tabla 9).

Tabla 9. Ponderaciones finales de cada tipo de tecnología

TD	$p(TD)$	PC	$p(PC)$	S	$p(S)$
TD1	0,49	PC1	0,47	S1	0,88
TD2	0,85	PC2	0,19	S2	0,88
TD3	0,78	PC3	0,47	S3	0,72
TD4	0,66	PC4	0,39	S4	0,32
TD5	0,74	PC5	0,51	S5	0,6
TD6	0,73	PC6	0,47	PTR	$p(PTR)$
TD7	0,59	PC7	0,36	PTR1	0,82
TD8	0,58	PC8	0,78	PTR2	0,80
TD9	0,34			PTR3	0,60
TD10	0,53			PTR4	0,18
TD11	0,79				

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9 se detallan los puntajes de mayor valor para cada caso (resaltados en negrilla), de lo cual se puede deducir que para la tecnología TD la placa con mayor ventaja para aplicaciones de IoT se identifica con el índice TD2. Esta tecnología corresponde a la tarjeta TTGO, obteniendo un puntaje de 0,85. La tecnología TD más cercana en puntaje es el índice TD3 (tarjeta Teensy) con 0,78, y el índice TD11 (tarjeta NodeMCU) con 0,79. Lo anterior concuerda con lo que algunos autores mencionan en sus trabajos y en la utilización de estas tarjetas para el desarrollo de aplicaciones [22].

Para el caso de la tecnología PC, el protocolo de comunicación con mayor ventaja es el índice PC8, que corresponde al protocolo Sigfox, cuyo puntaje fue de 0,78, obteniendo un amplio margen sobre las demás tecnologías. El protocolo más cercano fue el índice PC5 (protocolo Neul) con 0,51. Los demás protocolos no alcanzaron el 0,50 de puntaje, lo cual permite deducir que sus características en conjunto no alcanzan a tener un potencial como el protocolo Sigfox. Sin embargo, cabe mencionar que varios autores recomiendan la utilización del protocolo LoRa cuando se trabaja en distancias de corto alcance [9], [13], [22].

En cuanto a la tecnología S, hay dos posibilidades de uso: con índice S1 (Python) y con índice S2 (Java), cuyo puntaje es de 0,88. Esto permite deducir que con cualquiera de las dos tecnologías se podría generar un *software* apropiado acorde a las prestaciones del IoT. La tecnología que le sigue a estos dos lenguajes de programación es la S3 (JavaScript), con un puntaje de 0,72.

Finalmente, para el caso de la tecnología PTR, se encontró que el índice PTR1 (placa Raspberry Pi), con un puntaje de 0,82, es el más adecuado para las aplicaciones IoT. No obstante, el índice PTR2 (placa BeagleBone) es una tecnología alterna que podría suplir las mismas necesidades, dado que obtuvo un puntaje de 0,80. Por consiguiente, se deben tener consideraciones adicionales para seleccionar el adecuado. Se definió, entonces, que el índice PTR1 tiene mayores ventajas respecto al índice PTR2, ya que la cantidad de periféricos que se le podrían conectar y la velocidad de procesamiento asociada es mayor en el primer caso. Además, de acuerdo con las Figuras 19 y 20, el índice PTR1 supera por un amplio margen al índice PTR2.

3.6 Esquema de conexión propuesto para desarrollos de Agricultura 4.0

Con los resultados de la Tabla 9 se consolida la propuesta para el esquema de Agricultura 4.0, conforme a las tecnologías seleccionadas y en coherencia con sus prestaciones y principales características. Se generó una posible interacción entre las tecnologías seleccionadas con el estadístico numérico, cuyo fin es proporcionar una plataforma para agricultura digital que permita poner en práctica el paradigma de IoT en desarrollos para pequeños productores del campo (Figura 21).

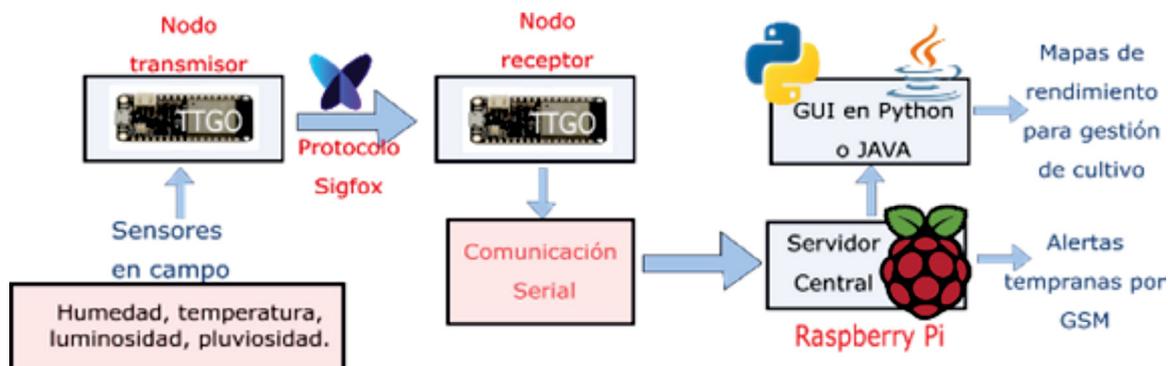


Figura 21. Plataforma para aplicaciones de Agricultura 4.0 con tecnologías del paradigma IoT

Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

Dada la importancia de aplicar herramientas tecnológicas y de la era digital en los procesos agrícolas se hace necesario seleccionar las tecnologías que estén acorde con las necesidades de los pequeños productores. Factores como el costo asociado, la facilidad de implementación, el bajo consumo energético, el *hardware* y el *software* de uso libre son características que permiten establecer una plataforma de Agricultura 4.0 para labores de análisis y producción de cultivos, generando así una propuesta accesible para la población de zonas rurales marginadas y pequeños productores.

La selección de tecnologías del presente artículo partió de una búsqueda documental de herramientas del paradigma IoT (y sus parámetros esenciales) aplicadas en agricultura, así como del uso de probabilidades para comparar dichos parámetros entre las tecnologías identificadas.

Así las cosas, los puntajes parametrizados de las probabilidades permitieron concluir qué tecnologías tienen mayor ventaja respecto a otras, haciendo referencia a los parámetros seleccionados. De esta forma se concluyó que un esquema para Agricultura 4.0 accesible y que cumpla con las prestaciones para una aplicación con enfoque agrícola se puede realizar con los siguientes elementos: tarjeta de desarrollo TTGO, protocolo de comunicación Sigfox, lenguaje de programación Java o Python y la placa de tamaño reducido Raspberry Pi.

Finalmente, cabe destacar que los elementos seleccionados para el esquema de Agricultura 4.0 permiten desarrollar un sistema que, en conjunto, posibilita hacer seguimiento a los cultivos, analizar y monitorear en tiempo real, lo cual potencializa las labores agrícolas de los campesinos que no pueden obtener tecnologías costosas. Por tanto, el esquema propuesto permite mejorar los procesos agrícolas y minimizar la brecha digital que existe actualmente en el campo, la cual genera un rezago de los pequeños y medianos productores respecto a los grandes cultivadores.

REFERENCIAS

- [1] J. Gonçalves Ribeiro, D. Yusuf Marinho y J.W. Martínez Espinosa, "Agricultura 4.0: desafios à produção de alimentos e inovações tecnológicas", in *Simpósio de Engenharia De Produção*, vol. 2, pp. 1-7, 2018.
- [2] S. Aheleroff et al., "IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study". *Adv. Eng. Informatics*, vol. 43, p. 101043, 2020.
- [3] A.F. Giraldo Cerón, "Tan cerca y tan lejos de la Agricultura 4.0 en Colombia". *Rev. Univ. EAFIT*, vol. 55, no. 175, pp. 78-85, 2020.
- [4] N. Trendov, S. Varas y M. Zeng, "Tecnologías digitales en la agricultura y las zonas rurales," *Doc. orientación FAO*, 2019.
- [5] N.U. Binda y F. Balbastre-Benavent, "Investigación cuantitativa e investigación cualitativa: buscando las ventajas de las diferentes metodologías de investigación," *Rev. Ciencias económicas*, vol. 31, no. 2, pp. 179-187, 2013.
- [6] L. García, "Estudio del impacto técnico y económico de la transición de internet al Internet de las cosas (IoT) para el caso colombiano". Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [7] R. Nukala, K. Panduru, A. Shields, D. Riordan, P. Doody y J. Walsh, "Internet of Things: A review from 'Farm to Fork,'" in *2016 27th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, pp. 1-6, 2016.
- [8] V.A.B. Meneses, J.M. Téllez y D.F.A. Velásquez, "Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión". *Aliment. Cienc. y Tecnol. Aliment.*, doi: 10.24054/01204211.v1.n1.2015.1647, 2017.
- [9] A. Rahman y M. Suryanegara, "The development of IoT LoRa: A performance evaluation on LoS and Non-LoS environment at 915 MHz ISM frequency", doi: 10.1109/ICSIGSYS.2017.7967033, 2017.
- [10] J.M. Talavera et al., "Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields," *Computers and Electronics in Agriculture*, doi: 10.1016/j.compag.2017.09.015, 2017.
- [11] S.I.O. Duque, "Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos". *Rev. Vector*, pp. 51-60, 2017.
- [12] A. Tzounis, N. Katsoulas, T. Bartzanas y C. Kittas, "Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges," *Biosystems Engineering*, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007, 2017.
- [13] T. Cao-Hoang y C.N. Duy, "Environment monitoring system for agricultural application based on wireless sensor network", doi: 10.1109/ICIST.2017.7926499, 2017.
- [14] S. Wolfert, L. Ge, C. Verdouw y M.-J. Bogaardt, "Big Data in smart farming-a review," *Agric. Syst.*, vol. 153, pp. 69-80, 2017.
- [15] C. Cambra, S. Sendra, J. Lloret y L. García, "An IoT service-oriented system for agriculture monitoring". doi: 10.1109/ICC.2017.7996640, 2017.
- [16] A. Kamilaris, A. Kartakoullis y F.X. Prenafeta-Boldú, "A review on the practice of Big Data analysis in agriculture". *Comput. Electron. Agric.*, vol. 143, pp. 23-37, 2017.
- [17] K.A. Patil, y N.R. Kale, "A model for smart agriculture using IoT", doi: 10.1109/ICGTSPICC.2016.7955360, 2017.

- [18] K. Foughali, K. Fathallah y A. Frihida, "Using Cloud IOT for disease prevention in precision agriculture", doi: 10.1016/j.procs.2018.04.106, 2018.
- [19] D.F. González Botero et al., "Planteamiento de un modelo de predicción de heladas en cultivos de rosa en la sabana de Bogotá", 2018.
- [20] A. Martínez y Y. Sánchez, "Implementación de una estación meteorológica basada en *hardware* libre para obtener datos climáticos y efectuar un análisis comparativo con los reportes *on line* dado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología". Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, 2018.
- [21] A. Pathak, M. AmazUddin, M.J. Abedin, K. Andersson, R. Mustafa y M.S. Hossain, "IoT based smart system to support agricultural parameters: A case study". *Procedia Comput. Sci.*, vol. 155, pp. 648-653, 2019.
- [22] J.P. Tovar Soto, J. de los S. Solórzano Suárez, A. Badillo Rodríguez y G.O. Rodríguez Cainaba, "Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual". *Lámpsakos*, 22, pp. 86-105, 2019.
- [23] A. Khanna y S. Kaur, "Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture". *Comput. Electron. Agric.*, vol. 157, pp. 218-231, 2019.
- [24] R.M. Math y N.V. Dharwadkar, "An Intelligent Irrigation Scheduling and Monitoring System for Precision Agriculture Application". *Int. J. Agric. Environ. Inf. Syst.*, vol. 11, 4, pp. 1-24, 2020.
- [25] M. Fahmideh y D. Zowghi, "An exploration of IoT platform development". *Inf. Syst.*, vol. 87, p. 101-409, 2020.