

Validación de la herramienta CellGis para simular propagación de ondas de radio en redes de telefonía celular

Aura Liliana Beltrán Blanco

Ingeniera Electrónica
Universidad Industrial de Santander
Investigadora grupo RadioGIS UIS
Bucaramanga, Colombia
aura.beltran@radiogis.uis.edu.co

Celso Andrés Forero F.

M.Sc.(c) Ingeniería área electrónica
Universidad Industrial de Santander
Investigador grupo RadioGIS UIS
Bucaramanga, Colombia
celso.forero@radiogis.uis.edu.co

Homero Ortega Boada

Ph.D. of Engineering Sciences
Kyiv International University of Civil Aviation, Ucrania,
Profesor Titular Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga, Colombia
homero.ortega@radiogis.uis.edu.co

César Camilo Rodríguez S.

M.Sc.(c) Ingeniería área electrónica
Universidad Industrial de Santander
Investigador grupo RadioGIS UIS
Bucaramanga, Colombia
cesar.rodriguez@radiogis.uis.edu.co

Resumen— Una de las principales necesidades, actualmente en Colombia, tiene lugar en el proceso de planeación de redes inalámbricas, por lo cual mediante el proyecto Gisgerram se busca crear un servicio de telecomunicaciones que permita la planificación de redes de antenas celulares a través de un servidor remoto. Sin embargo, para poder lograrlo es necesaria primero la verificación de las herramientas que serán usadas para este servicio. Dentro de este macroproyecto se desarrolló el CellGis, en este artículo se describe la validación de dicha herramienta en la región andina, mediante la ejecución de campañas de medición real de potencia en 4 zonas de Bucaramanga, y el contraste con las simulaciones arrojadas por CellGis con el fin de analizar el funcionamiento del simulador de radiopropagación con el algoritmo AndinoUIS implementado, lo cual permitió la deducción de falencias. De esta forma, se realizaron las modificaciones necesarias para la correcta utilización del patrón de radiación, mediante las mediciones se determinaron algunos efectos que el algoritmo no tiene en cuenta, de forma que en trabajos futuros se puedan programar e implementar nuevos algoritmos que incluyan dichos factores. Paralelamente, se tomaron mediciones de radiación no ionizante en diferentes zonas de Bucaramanga, y posteriormente se verificaron los valores obtenidos con las normas que regulan la exposición con el fin de comprobar su debido cumplimiento.

Palabras clave— CellGis, Modelo de Propagación AndinoUIS, Radiación no Ionizante, Radio propagación, Servicio de Telecomunicaciones.

Abstract— One of the principal needs nowadays in Colombia is in the field of wireless network planning, given this situation the gisgerram project has the aim to create a telecommunications service that allows network planning from cellular antennas via a remote server, however to be able to achieve this, it is necessary first to verify the tools that will be used for this service. cellgis was developed within this macro-project, therefore,

this article describes the validation of that tool in the andina region, measurement campaigns were conducted in 4 bucaramanga's zones, and by comparing them with the simulations in cellgis, the functioning of the stimulator of the radio propagation was analyzed with the implemented andinouis algorithm, where the shortcomings were detected and the adjustments were made through plugin-improvements, so that the algorithms which include the described factors could be programmed and implemented in future assignments, radiation measurements were conducted in some bucaramanga's zones, then the values obtained were checked with the rules governing the exposure, with the purpose of to verifying its compliance.

Keywords— CellGis, Non-ionizing Radiation, Propagation Model AndinoUIS, Radio propagation, Telecommunication Service.

INTRODUCCIÓN

Este artículo está motivado por un trabajo realizado con el fin de implementar correctamente un algoritmo del modelo de propagación AndinoUIS, desarrollado por el grupo RadioGis de la Universidad Industrial de Santander [1], [2], sobre la herramienta de planeación de redes de radio denominada CellGis, desarrollada por el grupo I2T de la Universidad ICESI [3]. El modelo es un aporte a las simulaciones que se realizan en las ciudades ubicadas en la región Andina, caracterizadas por un relieve montañoso. CellGis es una herramienta que exige la implementación en Java de los algoritmos para los modelos de propagación. Para el caso del modelo AndinoUIS, la implementación en Java se describe en [4], cuyo

trabajo referenciado no presenta una validación completa con mediciones reales. Por esta razón, se busca no sólo describir el modelo AndinoUIS, su implementación sobre CellGis, sino también su validación en una red real gracias al apoyo del operador TIGO. Finalmente, se comprueba la viabilidad de usar el Algoritmo AndinoUIS dentro de la herramienta CellGis.

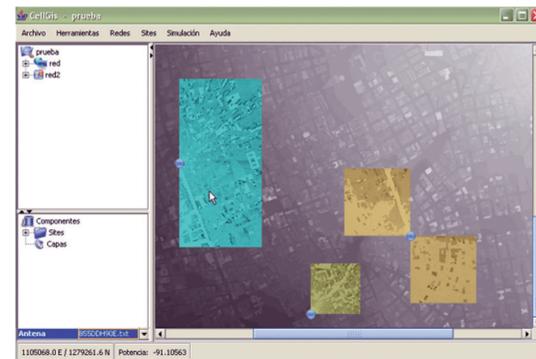
La importancia de este trabajo es independiente de CellGis, ya que el algoritmo propuesto puede implementarse en cualquier otra herramienta de simulación de radiopropagación. Se describe el modelo AndinoUIS, de igual forma, se demuestra su validez y se brindan resultados que reflejan lo que puede esperarse de su implementación para simular la radiopropagación en ciudades con relieve ondulado como ocurre en la región andina.

II. HERRAMIENTA CELLGIS

CellGis es una herramienta desarrollada en el lenguaje *Java* y basada en Sistemas de Información Geográfica (GIS), que permite probar e introducir diversos modelos de radiopropagación para la simulación de coberturas de potencia a partir de información geográfica que se carga digitalmente en un GIS. Es un sistema para planificación de redes celulares que brinda al usuario la posibilidad de generar un archivo de proyecto con la configuración de la red celular. Es totalmente transportable entre plataformas y equipos donde esté instalado el sistema, ocupa muy poco espacio en disco debido al uso del estándar ZIP16 que comprime los datos, y reduce el tamaño de los archivos que genera. Durante dos años, se ha trabajado en el proyecto CellGis, la herramienta incorpora manejador de cartografía avanzado. Igualmente, se ha incorporado un algoritmo para la estimación de niveles de radiación no ionizante, según la norma ITU-T K.52.

El principal objetivo de la aplicación es permitir al usuario crear una o varias redes de transmisores de comunicación inalámbrica representadas como puntos ubicados sobre un mapa; para luego, por medio de algoritmos especiales que representa a los modelos de propagación, predecir el nivel de señal originado por esta(s) red(es), y desplegar los resultados gráficamente (Figura 1) o en forma de archivo.

FIG. 1. INTERFAZ HERRAMIENTA CELLGIS



EL MODELO ANDINOUIS

El modelo de propagación AndinoUIS es un aporte del grupo RadioGis en cooperación con el grupo I2T que combina el modelo COST231, una modificación del modelo Walfisch-Ikegami y elementos de la Teoría de Difracción Uniforme (UTD) para tener en cuenta fenómenos particulares detectados en ciudades ubicadas en terreno con ondulaciones, característico de ciudades de la región andina. El nivel de predicción dado por el modelo *COST231-Walfisch-Ikegami* es mejorado según parámetros adicionales que consideran los fenómenos de Difracción en la propagación establecidos en la Recomendación P. 526 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU).

A. Formulación del modelo AndinoUIS

Al igual que el *COST231-Walfisch-Ikegami*, el modelo AndinoUIS distingue entre situaciones de línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS) [2].

- *Caso de LOS*: En este caso la frecuencia y la distancia son los parámetros importantes al momento de calcular las pérdidas en el espacio libre, las distancias a considerar deben ser mayores a 20m (d es expresada en Km y f en MHz).

$$L(dB) = 42.6 + 26 \log(d) + 20 \log(f)$$

- *Caso de NLOS*: En este caso el modelo tiene en cuenta pérdidas por espacio libre (L_0), pérdidas por difracción de múltiples filos de cuchillo antes del techo del último edificio (L_{msd}), pérdidas ocasionadas por el techo del último edificio y un proceso de dispersión

ocurrido a esta altura (L_{rts}) y pérdidas por difracción en los cruces de calles (L_{cv}).

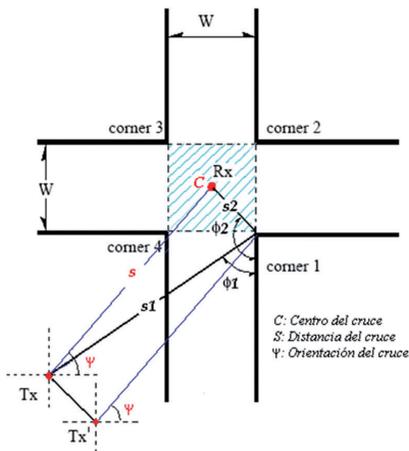
$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \text{ para } L_{rts} + L_{msd} > 0$$

En las pérdidas por espacio Libre (L_0) sólo es relevante la frecuencia de transmisión y la distancia mínima entre transmisor-receptor.

B. Difracción de Convergencia de Vías:

Una convergencia de vías corresponde al área de intercepción de dos calles/ carreras en un entorno urbano o un entorno formado por un conjunto de esquinas (Figura 2), el número de esquinas lo determina la forma de la vía. Existen dos formas básicas que son en forma de cruz (cuatro esquinas) o en forma de T (dos esquinas).

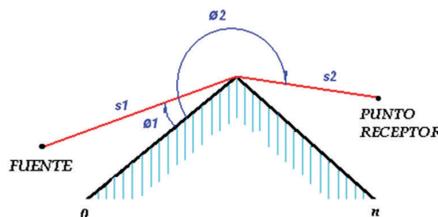
FIG 2. CONVERGENCIA DE VÍAS



Fuente [2].

Para modelar el comportamiento de la señal en dichas áreas, se parte del análisis de Difracción en esquinas establecido por la Teoría de Difracción Uniforme (UTD), como se observa en la Figura 3. En esta figura se evidencia la geometría que se tiene en cuenta para los cálculos del campo en el punto receptor.

FIG. 3. GEOMETRÍA BÁSICA DE DIFRACCIÓN EN ESQUINAS



Fuente [2]

La formulación UTD está dada por:

$$e_{UTD} = e_0 \frac{e^{-jks_1}}{s_1} D_{\parallel} \perp \sqrt{\frac{s_1}{s_2(s_1+s_2)}} e^{-jks_2}$$

e_{UTD} : Magnitud de campo en el punto receptor

e_0 : Magnitud de campo de la fuente

S_1 : Distancia fuente a la esquina de difracción

S_2 : Distancia de esquina de difracción a punto receptor

k : Número de onda

$D_{\parallel} \perp$: Coeficiente de difracción.

La Teoría de la Difracción Uniforme proporciona una herramienta efectiva para predecir la difracción en las convergencias de vías. Sin embargo, su implementación sólo se logra en programas de predicción basados en el trazado de rayos (ray-tracing) como por ejemplo, el CRC- Predicts, dentro del modelo AndinoUis no puede ser implementado a cabalidad. Por esta razón en el desarrollo del modelo AndinoUis se establece un replanteamiento de la forma básica de la formulación UTD, al considerar que se cuenta con una herramienta de planificación que maneja base de datos tipo Raster y que no se trabaja con determinado tipo de información como por ejemplo, las propiedades eléctricas del material de construcción de los edificios.

Con esto se define:

$$e_{UTD} = \left[\frac{e_0}{s} |D| \sqrt{\frac{s}{0.707ws + 0.5w}} \right] e^{-jk(s + 0.707w + \frac{\pi}{4k})}$$

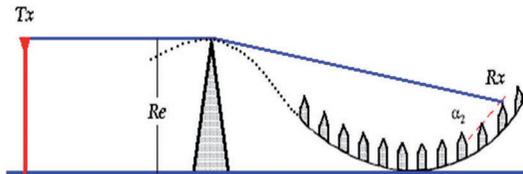
C. Moldeamiento del terreno

Para realizar el modelamiento de un entorno debemos tener en cuenta la disposición de los obstáculos a lo largo de las trayectorias o rutas de la línea directa entre transmisor y receptor, se caracteriza de la mejor manera el impacto que ocasiona en factor del desvanecimiento de la magnitud de la señal. Para calcular las pérdidas que ocasionan dichos obstáculos, se suele idealizar su forma. En la radiopropagación existen dos técnicas muy conocidas que son: Difracción por filos de cuchillo y Difracción por cilindros.

- Modelamiento del terreno mediante el Método de Difracción por Filo de Cuchillos:

En esta aproximación, el obstáculo ya sea un edificio o una prolongación del terreno (i.e. colina), es aproximado a un filo de cuchillo, es decir, el obstáculo es considerado como media pantalla absorbente, tal como se muestra en la *Figura 4*. El mecanismo de difracción en este tipo de elementos representa un caso particular de la difracción por fillos y esquinas.

FIG. 4. MÉTODO DE DIFRACCIÓN POR FILOS DE CUCHILLO



Fuente [2]

Existen varias aproximaciones de fillos de cuchillos, entre ellas se destaca el método de Deygout, la corrección de Causebrook y el método de Giovanelli [6]. Sin embargo, para calcular las pérdidas por propagación sobre un entorno de terreno irregular, se suele emplear análisis de difracción múltiple mediante la Integral para Múltiples Fillos de Cuchillos Difractores, empleada también en el desarrollo de otros modelos de propagación, por ejemplo, el modelo Walfisch-Bertoni y el ya mencionado modelo COST231-Walfisch-Ikegami [7],[8].

D. Consideraciones planteadas por el Modelo Andino UIS

Las características de la topografía presente en nuestra región conduce al algoritmo a tener en cuenta las irregularidades del terreno. Los sistemas Outdoor de microceldas diseñados para zonas urbanas poseen radios de cobertura menor de un km de distancia y al ubicarnos en una zona urbana, encontramos una densidad de edificios bastante considerable, a esto se le suma las características del terreno, lo que representa obstáculos entre la línea de vista (LOS) del transmisor y el receptor.

Al considerar lo anterior se puede decir que la predicción de las pérdidas de propagación son establecidas por una altura promedio de los obstáculos como se establece en los análisis presentados por Lee en donde se plantea que las variaciones de terreno dentro de un área menor a un km puede ser omitidas sin incurrir

en un error significativo. Por tanto, se plantea la aplicación de la difracción por múltiple filo de cuchillos y se referencian las alturas de los obstáculos respecto al receptor, aplicándolas en el modelo Andino UIS, quien presenta variaciones en las fórmulas del modelo COST231-Walfisch-Ikegami, quien fue planteado basándose en la aplicación de la difracción por fillos de cuchillo [2].

IV. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE VALIDACIÓN DE CELLGIS

Los procesos de validación son sistemas de aseguramiento de la calidad mediante los cuales se demuestra si un proceso conduce a resultados consistentes dentro de las especificaciones predeterminadas. El proceso de validación se lleva a cabo mediante sub-procesos:

Se inicia con las actividades de pre-validación las cuales consisten en la recopilación de la información relacionada con el proceso, se determina la instrumentación que se va a utilizar y luego se define la metodología aplicada.

Posteriormente se efectúa el desarrollo de la validación, durante esta fase se recopilan las muestras de niveles de potencia y se obtienen las simulaciones respectivas para poder hacer los análisis correspondientes.

Finalmente se da un concepto de aceptación o rechazo, así como conclusiones y las recomendaciones, para realizar ajustes en caso de que exista la necesidad.

V. ACTIVIDADES DE PRE-VALIDACIÓN Y DEFINICIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS

A. Selección de la instrumentación medición espectro

En las campañas de medición realizada se hace uso de diferente instrumentación:

Para las dos primeras zonas se dispuso del equipo de Drive Test con el que cuenta la Universidad Industrial de Santander que está compuesto por: Analizador de Espectros R&S ZVL6, receptor GPS, par de antenas omnidireccionales modelo HG1911U-PRO con 11 [dBi], generador de señales ROHDE&SCHWARZ. Como se visualiza en la *Figura 5*.

FIG. 5. EQUIPOS DE MEDICIÓN



Sin embargo, con el fin de minimizar errores en los valores, y gracias al apoyo de la empresa TIGO, se trazaron dos rutas más con software de alta calidad prestados por la empresa.

B. Metodología de medición espectro

Se basa en las recomendaciones UIT y IEEE.

- *Selección de Equipos:* Se basó tanto en la facilidad de su préstamo como en la necesidad de medición requerida.
- *Elección de las zonas:* Para las dos primeras zonas medidas, debido a que se genera la señal en la banda de telefonía móvil, se requirieron zonas en donde al generar la señal existiera las características necesarias para que la antena irradie de forma correcta. Para la zona 3 y 4 se hizo basados en la información de antenas Tigo suministradas por la empresa. Para la elección de zonas se tienen en cuenta variables como: accesibilidad, disponibilidad de datos de la antena transmisora, tipo de terreno, entre otras.
- *Definición del Plan de Medición:* Se seleccionan los parámetros más relevantes para el Drive Test a realizar como cantidad de estaciones a medir, Frecuencia Central, Span, RVW, otros.
- *Ejecución de la campaña de medición:* Se realiza la instalación y conexión de equipos en el vehículo, luego la revisión de carga de batería de los instrumentos y finalmente a la ejecución de las mediciones como tal.

C. Variables de Interés

Entre el transmisor y el receptor, el canal inalámbrico se modela mediante varios parámetros claves, los que tienen relevancia en este trabajo son: tipo de terreno, climatología de la zona, altura de las antenas, obstáculos, PIRE, patrón de radiación de las antenas, entorno topográfico. La altura de los obstáculos en función de la posición del receptor es el parámetro que implica que la primera zona de Fresnel sea o no obstruida, de esto depende que existan o no pérdidas considerables en la intensidad de campo.

Según los análisis presentados por Lee, las variaciones del terreno dentro de un área menor a un km pueden ser omitidas sin incurrir en grandes rangos de errores. Así, las áreas han sido previamente seleccionadas de manera que cumplan con las características necesarias para poner a prueba la efectividad de la herramienta con el modelo AndinoUis. Se seleccionaron para ello zonas urbanas sobre colinas, zonas de densidad urbana con clara definición de convergencias de vías, aledañas a parques y con gran arborización, entre otras.

VI. DESARROLLO DE LA VALIDACIÓN

A. Mediciones de espectro en la banda de telefonía

En este tópico se tiene gran interés por tener datos confiables de los resultados obtenidos de una medición, mitigar los errores que puedan existir en la toma de la medida y garantizar la repetitividad de la variable en cuestión. Por lo tanto, para eliminar los efectos de desvanecimientos rápidos se determina el nivel de señal recibido mediante el promedio de al menos dos mediciones sobre un mismo sector en diferente día y horario.

El sistema completo es compuesto por 4 estaciones base ubicadas en puntos específicos de la Ciudad de Bucaramanga: San Francisco, La Concordia, Sotomayor y el Prado abarcando diferentes tipos de terreno. A lo largo de las dos primeras zonas se genera una señal portadora, por medio de un generador de señales a una frecuencia dada, dentro de la banda de telefonía y con determinada potencia, conectado a una antena que servirá de transmisora, al mismo tiempo, en un vehículo dotado con el analizador de espectros y una an-

tena receptora se hace un recorrido con el fin de capturar la señal en diferentes sitios. Con la información aportada por el operador de telefonía móvil TIGO de las antenas ubicadas en algunos sectores de Bucaramanga, se realizó un estudio en otros dos sectores de la ciudad en la banda de telefonía del operador.

Es importante tener en cuenta que los valores arrojados por el analizador de espectros no pueden ser contrastados directamente con las simulaciones que se realizan, pues el dato que se toma del analizador ya ha pasado tanto por la antena como por el cable que conecta dicha antena al analizador, y nuestro interés radica en conocer la potencia antes de la antena receptora. Por lo tanto, es necesario aplicar la siguiente aproximación:

$$\text{Valor real} = \text{Valor medido} - \text{Ganancia antena} + \text{Pérdidas del cable}$$

En una fase previa de caracterización de las antenas y de los cables utilizados se generó una tabla de correspondencia entre frecuencia y pérdidas de cable. Para la banda de telefonía móvil se encontró que dichas pérdidas son de 0,47 [dB]. La ganancia de la antena que debe tenerse en cuenta al momento de realizar el cálculo del enlace en nuestro caso fue de 11 [dBi]. Para las zonas 3 y 4 en donde se midieron las antenas de Tigo, lo relevante eran las pérdidas In Car (por el uso de un auto) de 6 [dBm].

B. Simulación de espectro

Las simulaciones se efectúan sobre un mapa ráster de la ciudad de Bucaramanga de tipo ASCII. CellGis cuenta por defecto un patrón de radiación Isotrópico, que modela una antena ideal que radia potencia con ganancia unitaria uniforme en todas las direcciones, sin embargo, se sabe que las antenas utilizadas en la práctica no son isotrópicas, por lo cual se decidió mejorar la versión con que se inició el proyecto y realizar una modificación para integrar el patrón de radiación de la antena. Tal como se muestra en la *Figura 6*, la interfaz gráfica de CellGis en su parte inferior izquierda, muestra las coordenadas en unidades UTM-Bogotá y la potencia en el punto.

Para generar la simulación deben crearse los enlaces o *sites*, en los cuales debemos aportar información de las alturas tanto de la antena transmisora como receptora. Posteriormente, se crean los sectores pertenecientes a cada *site*, cada sector nos pedirá el *pire* en [dBm], la frecuencia en [MHZ], es decir, un sector contiene la información del transmisor. Posteriormente se adiciona un *site*, es decir se selecciona el lugar donde será localizada la estación base.

Para planificar correctamente las redes de celular mediante Cellgis es necesario contar con gran cantidad de información específica de las antenas, como lo son altura de la antena, altura de la torre, referencia de la antena, *pire*, ganancia, azimut y *tilt*, entre otras.

FIG. 6. VISUALIZACIÓN DEL VALOR DE POTENCIA



Para el proyecto fueron usados dos patrones de radiación diferente de la siguiente forma:

- San Francisco y La Concordia: Antena Omnidireccional
- Sotomayor y El Prado: Antena de Polarización Cruz 65 referencia 742 212/ APX18 de *Kathrein Mobilcom* Brasil.

Así se crearon modelos de los dos tipos de antenas que se usaron en este proyecto en forma de un archivo de 360 filas por 90 columnas en el que cada celda tiene información específica.

El análisis que se describe a continuación se soportó en dos tipos de simulaciones, una con el patrón de antena que viene por defecto en el CellGis (Isotrópica) y otra con el patrón real de la antena. Esto con el fin de comprobar que el AndinoUis presenta mejores resultados en la práctica que los descritos en trabajos anteriores

C. Análisis

Se realiza el análisis comparativo tanto gráfico como estadístico de los resultados de la cobertura

ra generada en las respectivas simulaciones y las mediciones tomadas. El modelo de propagación se experimentó en las frecuencias de la banda de telefonía móvil, alrededor de 1900 [MHz], por ser la banda de TIGO. La cantidad de muestras recolectadas tanto en simulación como en mediciones de campo son bastante extensas, por esta razón sólo se comentan los datos más relevantes y los que surgen de su análisis. Se utilizaron cerca de 10.104 puntos de medición, cada medición ejecutada en dos diferentes jornadas.

Para cada uno de los sectores se realiza un estudio estadístico que implica un análisis de varianza. En este caso el estudio realizado es el ANOVA mediante el cual se puede corroborar si los valores obtenidos experimentalmente y los simulados varían significativamente, de igual forma se procedió a obtener la diferencia entre las mediciones y las simulaciones. El análisis ANOVA para las 4 zonas arrojó resultados similares que corroboró las capacidades de la herramienta *CellGis* para simular niveles de potencia en la zona andina, mediante el algoritmo *AndinoUis*.

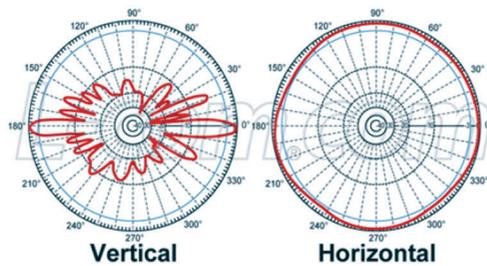
- Con el fin de valorar el efecto de la implementación de los patrones de radiación desarrollada en este trabajo, se realizaron validaciones de dos tipos:
- Validación tipo 1: se usa el patrón de radiación que trae el *CellGis* por defecto, es decir, Isotrópico.
- Validación tipo 2: Se usa el patrón real de la antena introducido como parte del trabajo desarrollado.

1) Zona 1 San Francisco:

Es importante destacar que una de las características propias de la zona y las 5 rutas realizadas para este Barrio, fue contar con condiciones topográficas casi uniformes (terreno semiplano), casi todo el trayecto contaba con Línea de Vista (LOS) hacia la estación Base BS1, debido a la poca presencia de edificios, es un sector de gran recurrencia pues encontramos cerca una iglesia y lugares públicos. En esta primer zona se trabajó con una señal controlada, emitida por un generador de señales ubicado en la azotea de un edificio de 5 pisos, la frecuencia de la portadora seleccionada es 1.9 Ghz con una potencia de 25 dBm. Fueron usadas las antenas omnidireccionales. La antena es modelo HG1911U-PRO, de propiedad

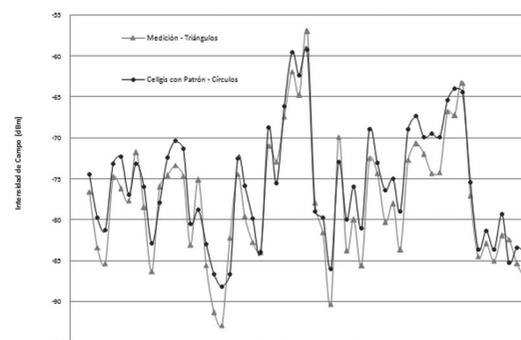
de *RadioGis* y presenta el patrón de radiación mostrado en la Figura 7.

FIG. 7. ZONA SAN FRANCISCO. PATRÓN DE RADIACIÓN



Para la **validación de tipo 1**, estadísticamente se encontró una diferencia máxima entre mediciones y simulación de 49,04 [dBm] y una diferencia promedio de 14,69 [dBm]. Estos valores nos indican que la simulación no cumple su objetivo, ni se modela de forma correcta el canal inalámbrico. En el caso de la **validación tipo 2**, se obtuvo una alta similitud entre resultados de simulación y de mediciones como se observa en la *Figura 8*. Al comparar la validación tipo 1 con la validación tipo 2, mediante desviaciones estándar, se pasa de un error del 84,454% a uno de 4,331%, lo que representa una mejora que además valida el funcionamiento de la herramienta con el algoritmo *AndinoUis* en esta zona. La desviación estándar en este proyecto cobra gran importancia, ya que representa el alejamiento de los datos tanto de medición como de simulación con respecto a su valor medio. La diferencia entre las desviaciones de los datos de medición y los de simulación con la validación tipo 2, es de 0,265 con lo que se demuestra la eficacia del algoritmo.

FIG. 8. ZONA SAN FRANCISCO. VALIDACIÓN TIPO 2



Resulta importante destacar que en validación tipo 2 se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,951, lo cual ratifica que se tiene una correla-

ción positiva alta entre los resultados de simulación y de mediciones. La diferencia promedio entre las mediciones y las simulaciones es de 2,765 [dBm].

2) Zona 2 La Concordia:

Esta zona fue seleccionada porque es un sitio de gran concurrencia, y por tener diversos sitios de comercio, por tanto, tenemos público expuesto a niveles de potencia por condiciones laborales, el barrio es un poco más pequeño que la zona 1, también el terreno que se buscaba para esta zona era más irregular y edificado. se contaba con trayectos tanto de línea de vista, como sin línea de vista hacia la estación Base BS2 con el fin de ver que tan acertado es el simulador en ambos casos. También se genera la señal, el generador ubicado en la terraza de un sexto piso, la frecuencia de la portadora es 1.914 [Mhz] con una potencia de 20 [dBm]. Al igual que en la zona anterior se hizo uso de las antenas omnidireccionales, por lo cual el patrón de radiación es exactamente el mismo.

Para la **validación tipo 1**, se puede resaltar el hecho de que los valores de la simulación distan significativamente de los datos experimentales, por lo cual es claro que éste tipo de simulación con antena isotrópica no es la más adecuada para éste fin. Estadísticamente se obtiene la máxima diferencia de 68,99 [dBm] y un promedio de 37,90[dBm], valores inaceptables en términos de planificación celular. En el caso de la **validación de tipo 2**, se encontró, en términos generales, una similitud entre mediciones y simulación. De todas formas se encontraron puntos donde la diferencia es un poco más notoria que en otros. En este sentido, cabe aclarar que la zona la Concordia, donde se realizaron las mediciones, incluye rutas con terreno bastante irregular. Además, entre la antena transmisora y la antena receptora se presentaron algunos edificios de alturas variables. Sin embargo, la tendencia de la simulación va acorde a la de las mediciones realizadas. Los resultados se aprecian en la *Figura 9*.

Estadísticamente la correlación entre las simulaciones y las mediciones es de 0,934, lo que significa que ambas series de datos tienen una relación muy estrecha con lo cual se reconfirma el adecuado desempeño del CellGIS con el algoritmo AndinoUIS y la implementación realizada del patrón de radiación de la antena.

3) Zona 3 Sotomayor:

Zona caracterizada por tener lugares sensibles como el Colegio San Pedro y una Iglesia muy cercanos a la antena, por eso se decidió elegirla como punto de medida, además un importante criterio es la densidad de árboles que se encuentran en la zona, de forma que se pueda mirar si la herramienta está apta para ésta clase de regiones o no, también las rutas cercanas a la estación base cuentan con varios cruces de vías; sin duda alguna, la mayor de las características que se quería abordar en esta zona era el tráfico de automóviles. De igual manera, se destaca por su condición parcial de NLOS hacia BS3, ya que sólo sobre un tramo del trayecto existía línea de vista. Esta zona corresponde a Sotomayor, en esta ocasión no se genera señal, sino se hace el estudio con los datos que se tienen de las antenas Tigo, uno de los factores que se tuvo en cuenta para elegir cual zona medir, se basó en el hecho de tener lugares sensibles cercanos a la antena. El software utilizado se llama *TEMS Investigation 11.0.3 Data Collection* perteneciente a la empresa Tigo, el cual se complementa con un celular especialmente adaptado a la herramienta y un Gps usado para geo-referenciar la posición. La interfaz de la herramienta podemos visualizarla en la figura 10.

FIG.9. ZONA LA CONCORDIA. VALIDACIÓN TIPO 2

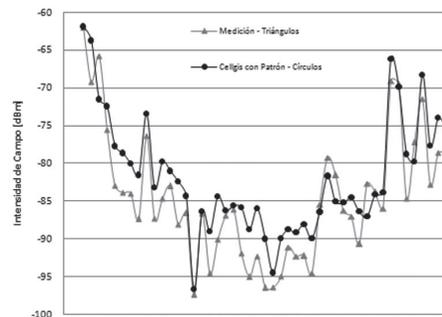
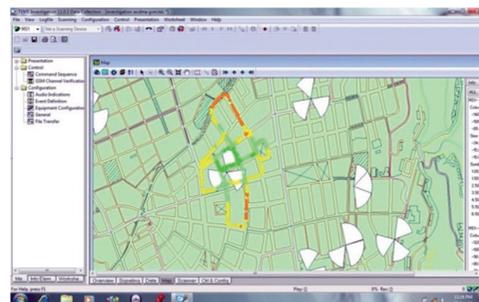
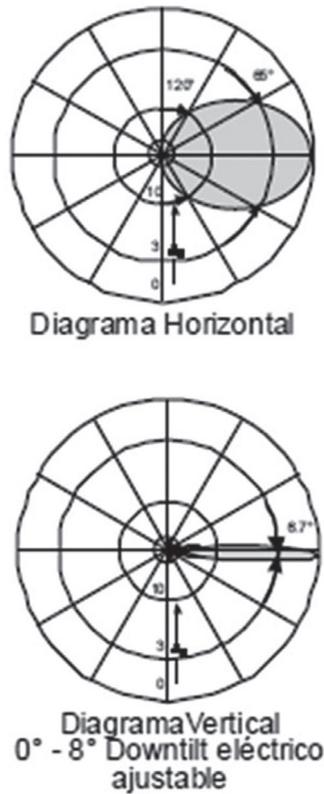


FIGURA 10. SOFTWARE TEMS INVESTIGATION 11.0.3



En esta tercera zona se hizo uso de una antena referencia 742 212/ APX18 de Kathrein MOBIL-COM BRASIL, la cual presenta un patrón de radiación visualizado en la *Figura 11*.

FIG. 11. ZONA SOTOMAYOR. PATRÓN DE RADIACIÓN



Como se ha notado en zonas anteriores, en el caso de **validación de tipo 1**, en este sector según muestra la *Figura 12*, la simulación con antena isotrópica tampoco funciona, ni cobra validez en la ejecución de simulación, este hecho se evidencia en un error de 221%, se encontraron diferencias hasta de 56,25[dBm] entre los resultados de las mediciones y de la simulación.

La representación de los datos en la *Figura 13* para la **validación de tipo 2**, permite contemplar la tendencia que tanto valores experimentales como simulados presentan para corroborar que los datos de la simulación son cercanos a los alcanzados con las mediciones. En términos estadísticos el error entre las desviaciones estándar de ambas cantidades es del 10,101% que en comparación con las tres zonas anteriores es más grande, pero que en general un error del 10% en desviaciones de simulación es aceptable, de acuerdo a la complejidad de un canal inalámbrico real.

La tendencia de los resultados, sigue la curva de las mediciones reales. Basándose en el coeficiente de correlación que fue hallado para el área de Sotomayor de 0,931, se puede constatar la buena correlación existente entre valores de mediciones y simulación. Aunque la diferencia máxima o delta máximo que se encontró en el contraste de cada estación es de 8,76 [dBm], cabe aclarar que este valor pertenece sólo a una de las estaciones.

FIG. 12. ZONA SOTO MAYOR. VALIDACIÓN TIPO 1

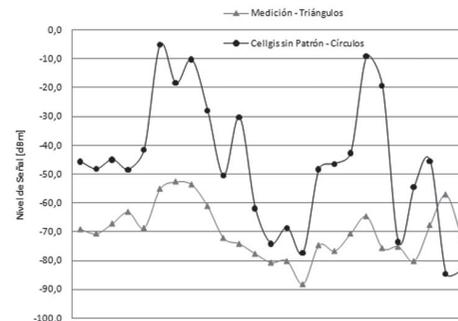
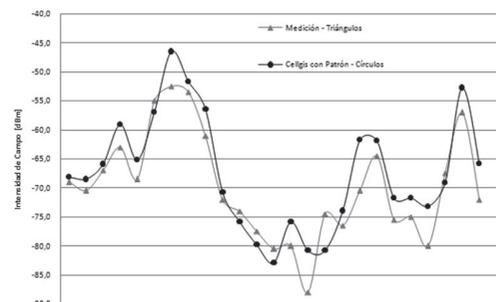


FIG. 13. ZONA SOTO MAYOR. VALIDACIÓN TIPO 2

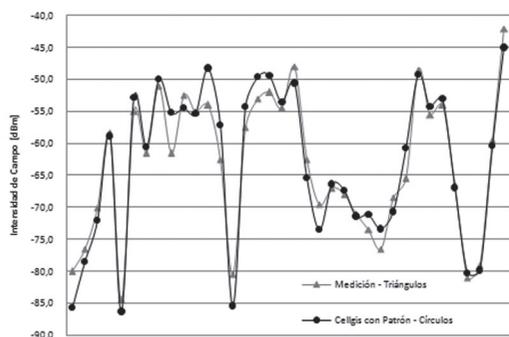


4) Zona 4 El Prado:

Es un lugar de alta densidad residencial, pues existe una gran cantidad de edificios a lo largo de todo el recorrido, sin embargo la antena o radio base se encuentra ubicada en la parte superior de uno de los edificios más altos. En la última región se hace uso de otro sector cubierto por Tigo. Se eligió por la forma de sus calles, es decir, es una zona en la que la cuadrícula de calles y carreteras está perfectamente definida, prototipo que se usará para saber si los niveles de señal mejoran frente a estas situaciones, adicionalmente es un lugar de alta densidad residencial. En la gran mayoría de ruta se cuenta con (LOS), para este caso el patrón de radiación es el mismo que se utiliza en el sector 3.

En el caso de **validación de tipo 1**, el coeficiente de correlación hallado es de $-0,293$ que demuestra que no existe una buena correlación entre los datos prácticos y los valores simulados. Y, al igual que en las tres zonas anteriores la disimilitud entre las mediciones llega hasta los $51,39$ [dBm]. En el caso de **validación de tipo 2**, se obtuvieron los resultados que se aprecian en la *Figura 14*, se puede distinguir de forma clara la semejanza entre los datos. En donde el coeficiente de correlación obtenido es de $0,972$, lo cual refleja la muy buena relación que existe entre las simulaciones y mediciones, lo que se conoce como correlación fuerte.

FIG. 14. ZONA EL PRADO. VALIDACIÓN TIPO 2



CONCLUSIONES

Mediante la correcta implementación del patrón de radiación de la antena, en CellGis se ha podido demostrar que el Modelo AndinoUIS resulta apropiado para simulaciones de radiopropagación en ciudades ubicadas en terreno montañoso como es el caso de la Región Andina, que presenta niveles de correlación superiores a $0,9$ entre resultados de medición y de simulación.

El contraste gráfico de niveles de potencia en comparación con los valores dados por la simulación arroja en algunas rutas resultados más óptimos que para otras zonas, este hecho radica tanto en el desnivel de terreno, como en los cruces de las calles, puesto que el modelo obtiene el mayor error en sitios en donde convergen las calles, sin embargo en todos los casos mencionados presenta mejores resultados que otros modelos conocidos.

En el barrio Sotomayor, se evidencian algunas diferencias notables en ciertos puntos de la ruta, como consecuencia de la alta densidad de vege-

tación y/o árboles a sus alrededores, lo cual genera una dispersión que no es contemplada por el modelo AndinoUIS ni en otros modelos disponibles en CellGis.

La presencia de automóviles en los lugares de medición influye directamente en los valores obtenidos, pues ellos reflejan la señal, sin embargo los problemas que puedan causar esta fuente de error son inevitables.

Los estudios realizados en las 4 zonas satisfacen todos los indicadores estadísticos, de forma favorable para determinar que la herramienta está en condiciones de realizar planificación celular.

Se recomienda realizar mejoras al Modelo AndinoUIS de forma que tenga en cuenta los materiales de los diferentes edificios, la temperatura o condiciones climáticas y la presencia de árboles. De forma que tenga un aporte directo en la exactitud de la predicción de los niveles de señal, de forma que el error sea aún menor.

REFERENCIAS

- [1] GARCÍA Alexis, ORTEGA Homero, CARREÑO Yair. Desarrollo del modelo de propagación Andino-UIS. Revista GTI Vol. 4. No 8, pp: 29 - 38 . Bucaramanga, Colombia. Enero - Abril. 2005. ISSN 1657-8236.
- [2] CARREÑO Yair. Tesis de Grado: Desarrollo del Modelo de propagación AndinoUIS, UIS, Bucaramanga, 2005.
- [3] C. Ardila. "Herramienta de planificación celular CellGis, Manual del usuario. Universidad ICESI". Disponible en: <http://CellGis.net/downloads>.
- [4] SOLANO, Jhon Camilo, JAIMES Leonardo Andrés. Implementación en Java del modelo de propagación andinoUIS® para planificación y análisis de redes celulares sobre CellGis. Tesis de grado. 2008.
- [5] GARCÍA A, Paolo, ORTEGA B., Homero, NAVARRO C., Andrés, RODRÍGUEZ A., Alexys. Efectos del terreno en la propagación electromagnética en entornos urbanos sobre la región andina usando el modelo Cost 231.Walfisch-Ikegami y herramientas de planificación basadas en GIS. Revista electrónica No. 1. SISTEMAS & TELEMATICA. Disponible en: http://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/item/387/1/agarcia-hortega-anavarro-arodriguez_efectos-propag.pdf
- [6] MURILLO, Juan. Fórmulas de Radiopropagación en Decibelios. Sevilla, España.
- [7] CARREÑO L., Yair I, GARCÍA A, Paolo, y ORTEGA B., Homero. Mejoramiento en la predicción de pérdidas

de Potencia en sistemas de comunicación móviles TDMA/IS-136 para entornos andinos mediante el uso del modelo *COST231-Walfisch-Ikegami*, campañas de medidas y el Cellview®. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Grupo de Investigación en Radio-comunicaciones - RadioGIS, Bucaramanga-Colombia, Septiembre de 2004

- [8] COST 231 Final report, Digital Mobile Radio: COST 231 View on the Evolution Towards 3rd Generation Systems, P. 134-140, Commission of the European Communities and COST Telecommunications, Brussels, 1999.
- [9] GALLO, Fideligna, PRIETO, Martha I, GARCÍA A, Paolo, y ORTEGA B., Homero. Análisis y Comprobación de los Niveles de Densidad de Potencia en las Inmediaciones de una Celda Sectorizada en un Entorno Andino Utilizando Sistemas de Información Geográfica (GIS) Y MatLab, Universidad del Valle en convenio con la Universitaria de Investigación y Desarrollo - Grupo Maxwell-UDI en Cooperación con el Grupo RadioGIS-UIS, Departamento de Ingeniería Electrónica, Bucaramanga-Colombia, Septiembre de 2004.
- [10] FORERO, Celso Andrés. Implementación de Servicio en Telecomunicaciones para Apoyo a la Gestión del Espectro Radioeléctrico.