

ANÁLISIS DE RADIOPROPAGACIÓN CON ANTENAS MICROCELDAS

ANALYSIS OF RADIOPROPAGATION WITH MICROCELL ANTENNAS

**AUTOR**

CELSE ANDRÉS FORERO
Msc(c) Ing. Electrónico
*Universidad Industrial de Santander
Investigador RadioGis
Escuela E3T
celso.forero@radiogis.uis.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

ADRIANA LUCÍA MORENO VERGEL
Ing. Electrónico
*Universidad Industrial de Santander
Investigador RadioGis
Escuela E3T
adriana.moreno@radiogis.uis.edu.co
COLOMBIA

AUTOR

LUIS FERLEY SIERRA JAIMES
Ing. Electrónico
*Universidad Industrial de Santander
Investigador RadioGis
Escuela E3T
ferley.sierra@radiogis.uis.edu.co
COLOMBIA

INSTITUCIÓN

*UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
UIS
Universidad Pública
Ciudad Universitaria
Carrera 27 Calle 9
COLOMBIA

INFORMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN O DEL PROYECTO: Proyecto interdisciplinario con código 1102-454-21991 culminado en Marzo de 2011 por el Grupo de investigación RadioGis de la Escuela de Ingenierías de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la UIS. Gracias a la financiación recibida de parte de la VIE (Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, código 8538, 8543), el DIF (División de Investigación y extensión de la Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas de la Universidad Industrial de Santander, código 5542) y el Estado Colombiano (Departamento Colciencias y Sena).

RECEPCIÓN: Abril 26 de 2011

ACEPTACIÓN: Junio 10 de 2011

TEMÁTICA: Telecomunicaciones

TIPO DE ARTÍCULO: Artículos de Investigación Científica y Tecnológica

ANALYTICAL SUMMARY

El presente artículo describe los resultados obtenidos luego de realizar tres campañas de medición en distintos puntos de la ciudad de Bucaramanga (Colombia). Se describen los requerimientos y la metodología para realizar el proceso de generación y medición de potencia electromagnética, analizando la propagación de una onda sinusoidal a una frecuencia específica atravesando edificaciones, espacio libre y otros obstáculos. A partir del análisis de los datos obtenidos se realiza el proceso de verificación y ajuste del modelo semi-determinístico de radiopropagación formulado por Yvo De Jong, el cual es una extensión del modelo de trazado de rayos para 2 dimensiones. Se comparan estas mediciones con la simulación realizada en un algoritmo computacional escrito en lenguaje de programación Java sobre el cual se están haciendo los ajustes de la implementación del modelo de radio propagación de De Jong. Para esto, se tienen en cuenta los fenómenos de refracción, reflexión y difracción en esquinas de edificios. En este algoritmo también se introduce el concepto de fuentes virtuales como estrategia para calcular computacionalmente estos fenómenos de la radio-propagación. Aunque en el momento se cuenta con un algoritmo que se encuentra en fase de desarrollo, puede observarse que los resultados predichos por el modelo implementado muestran un comportamiento similar a los resultados obtenidos en las campañas de medida obteniendo un error rms de 7,4 dB haciendo la salvedad de que sólo se toman en cuenta las muestras donde los valores calculados computacionalmente estén por encima del piso de ruido registrado por el instrumento de medición, que en este caso son los valores de potencia mayores a -85dBm. En la sección final del presente artículo se mencionan algunos comentarios sobre este resultado y los trabajos que dan continuidad a este estudio con el fin de perfeccionar la implementación del modelo de radiopropagación.

KEYWORDS: Medición del espectro, Microceldas, Potencia electromagnética, Radiopropagación, Trazado de Rayos.

ANALYTICAL SUMMARY

This paper describes the results after performing measurement campaigns at three different places in the city of Bucaramanga (Colombia). It describes the requirements and methodology to generate an electromagnetic signal and to measure its power density in order to analyze the propagation of a single frequency sine wave through buildings, open space and other obstacles. Then, the verification and adjustment of the semi-deterministic radio propagation model formulated by Yvo De Jong was performed from the analysis of this data, this model is an extension of the ray tracing model for 2 dimensions. These measurements are compared with the simulation performed by a computer algorithm written in Java programming language upon which is being fixed for the implementation of De Jong radiopropagation model. For this purpose, the phenomenon of refraction, reflection and diffraction at corners of buildings have been taken into account. this algorithm also introduces the concept of virtual sources as a strategy to computationally calculate these radio-propagation phenomena. Although we have now an algorithm that is under development, it can be seen that the results predicted by the implemented model show a similar behavior to the measurement campaigns results, obtaining a rms error of 7.4 dB making except that only the samples where the computationally calculated values are above the noise floor recorded by the meter are taken into account, in this case this numbers are the power values greater than -85dBm. At the final section of this article are some conclusions about this result and the next step to enhance implementation of the radio propagation model is commented

KEYWORDS: Electromagnetic power, Microcell, Radiopropagation, Tracing, Spectrum Measurement

INTRODUCCIÓN

La justificación del presente trabajo se basa en la necesidad de estudiar en detalle el comportamiento de las ondas irradiadas por antenas de tipo microcelda a 1,9 GHz. Debido al gran aumento de usuarios de telefonía celular y la necesidad de instalar nueva tecnología para aumentar la cobertura de servicios sobre las redes celulares, se genera la necesidad de unos estudios y análisis de interferencia y cobertura rigurosos y detallados para planificar la instalación de nueva infraestructura para las antenas.

Cada vez se construyen edificios o torres de apartamentos más altos (Superiores a 5 pisos) y de igual manera se incrementa el uso de teléfonos celulares en Colombia (Más de 40 millones de usuarios al final del 2008) [I], como también se ha llegado cerca a los 3,9 millones de usuarios de Internet a través de la Telefonía Móvil Celular (TMC) [II]. Todo esto conlleva a que las empresas de TMC deban reorganizar la distribución de sus celdas e implementar el uso de microceldas.

Las microceldas poseen coberturas entre 100 m y 1 Km, en cambio, las macroceldas superan a 1 Km. En las microceldas las antenas poseen alturas entre los 2 m y los 15 m sobre el nivel de la calle, mientras que las de las macroceldas superan los 15 m de altura; estas características de las microceldas ayudan a obtener un mejor manejo del tráfico de la red de TMC, puesto que ya no es una sola Radio Base de una macrocelda la que tiene que encargarse de una gran cantidad de usuarios, sino que son varias Radio Bases de microceldas las que tendrán que manejar el tráfico distribuido en cada una de ellas, lo que permite transmitir a menor potencia de radiación manteniendo una calidad en el flujo de datos más controlada para los usuarios.

En el trabajo realizado para avanzar un paso más hacia la investigación del fenómeno de radiopropagación en ondas electromagnéticas, se logró ejecutar un proceso de experimentación a campo abierto mediante la medición de potencia electromagnética gracias a los equipos suministrados por los grupos de investigación RadioGis, en alianza con el grupo de investigación CPS de la Universidad de Santander. Logrando, luego de superar numerosos inconvenientes de adecuación y logística, obtener una considerable colección de registros formales de potencia durante la transmisión y recepción de señal electromagnética considerando tres entornos diferentes: un ambiente a espacio abierto para analizar decaimiento de potencia en aire libre, una zona con un par de edificios ubicados en medio del canal de propagación, y una última prueba considerando cuadradas completas de diversas edificaciones entre el transmisor y el receptor dispuestos a propósito para generar fenómenos físicos tales como reflexión y refracción sobre la onda electromagnética propagada.

En el presente informe, se muestran los detalles para realizar las campañas de mediciones, dando a conocer los equipos tales como el generador de señal, el receptor analizador de espectro y las antenas utilizadas, sus características y las restricciones que poseen. Además se ilustra el sector donde se realizó cada una de las mediciones y los datos obtenidos de la densidad de potencia medida en cada punto para una frecuencia alrededor de 1.9 Ghz. Finalmente se realiza un análisis para los ajustes de los parámetros requeridos en el algoritmo de radiopropagación realizado con base al modelo de Yvo De Jong.

1. TEORÍA DE RADIOPROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE

La potencia atenuada debida a la propagación de la onda en el espacio libre se calcula según la fórmula (1).

$$\text{Pérdidas en espacio libre (FSPL)} = P_t/P_r \quad (1)$$

En donde:

$$P_t = \text{Potencia transmitida} = \text{Densidad de potencia} * 4\pi * d^2$$

$$P_r = \text{Potencia recibida} = \text{Densidad de potencia} * \text{Apertura}$$

En un receptor, la apertura de la antena puede ser vista como el área de un círculo dibujado perpendicular a la trayectoria de la onda recibida donde la radiación que atraviesa el círculo es entregada por la antena a una carga acoplada [III].

Para una antena isotrópica la apertura es:

$$\text{Apertura} = \lambda^2/4\pi ; \text{ donde } \lambda = c/f = \text{longitud de onda}$$

De lo anterior se deduce que las pérdidas de potencia en espacio libre resultan ser como indica la ecuación (2).

$$\text{FSPL} = \left(\frac{4\pi d f}{3 \times 10^8} \right)^2 \quad (2)$$

Y transformando a unidades de deci-Belios resulta en la ecuación (3). [III].

$$\text{FSPL (dB)} = 20\log(d_{[\text{km}]}) + 20\log(f_{[\text{MHz}]}) + 32.44 \quad (3)$$

2. MODELO DEJONG

En 1997 el investigador Yvo Leon De Jong comenzó a realizar experimentos de radio propagación en diversos ambientes urbanos de Europa para encontrar las principales causas de imprecisión de los programas de simulación comerciales al predecir la radiación en las nuevas redes celulares de micro celdas [4]. Llegó a la conclusión de que era importante tener en cuenta los rayos de la onda que atravesaban los edificios, para así

poder calcular correctamente la radiación en las zonas en que los edificios obstaculizaban la línea de vista con la estación base, así mismo demostró la relevancia de tener en cuenta la difracción en esquinas no solo para la onda externa sino también para la onda refractada que atraviesa el edificio, además de que demostró la influencia de la dispersión producida por los árboles.

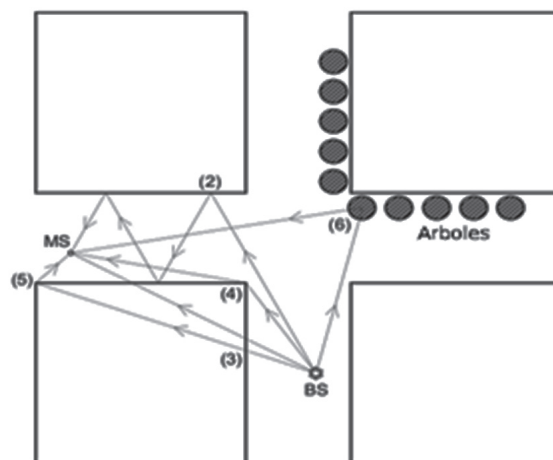
El modelo es inspirado en el principio de Huygens para considerar los fenómenos de reflexión, difracción y refracción como un conjunto de fuentes virtuales que se generan en los puntos donde la onda emitida por la fuente original choca con un obstáculo ubicado en la trayectoria de propagación. Estas fuentes virtuales generan a su vez una zona de radiación específica que da continuidad a la propagación de la onda.

Este modelo de radiopropagación es una aproximación a modelo en dos dimensiones 2D [V] [VI], tomando en consideración las siguientes condiciones [VII]: 1. Las alturas tanto de la antena en la radio base o estación base (BS) como la antena de la estación móvil (MS), son menores que las alturas de los edificios; 2. La geometría de la dispersión por los objetos se describe en dos dimensiones, por consiguiente, todos los rayos se propagan en un plano horizontal. 3. Como este modelo se desarrolló para comunicaciones móviles entonces se asume que la polarización es vertical, esto indica que el campo eléctrico es paralelo con las paredes de los edificios.

El modelo original de DeJong utiliza las siguientes seis formas de propagación: 1. Línea de Vista, 2. Reflexiones con las paredes de los edificios, 3. Transmisión a través de los edificios, 4. Difracción externa por las esquinas de los edificios, 5. difracción interna por las esquinas de los edificios, 6. Dispersión coherente e incoherente por árboles sobre las calles [VII]. También se ha de tener presente las múltiples combinaciones que se puedan llegar a obtener de las seis anteriores formas de propagación de las ondas sin olvidar el número de iteraciones que se ha predeterminado en la simulación tanto en forma general (Las combinaciones) como en cada uno de los mecanismos por separado.

La Figura 1 muestra cinco de los seis mecanismos de propagación del modelo DeJong.

FIGURA 1. MECANISMOS de propagación en el modelo DeJong [VII]



Para utilizar el algoritmo basado en el modelo DeJong se necesita: bases de datos o mapas digitales que especifiquen las coordenadas en 2-D de las esquinas de cada edificio, las coordenadas de los árboles, la permitividad de las paredes, la ubicación y el patrón de radiación de la BS en el plano horizontal, la frecuencia, la resolución espacial, el máximo grado u orden de rayos permitidos, entre otros parámetros para poder hacer la simulación. Los árboles y las Estaciones Base nunca deberán estar dentro de un edificio sino en su exterior. El modelo requiere información sobre la permitividad relativa de los muros y las coordenadas del exterior del edificio, además de un factor de atenuación relacionado a la estructura interna del edificio.

Empíricamente De Jong obtuvo valores promedios de: Factor de Permitividad $\epsilon_r = 5$, conductividad = 0, Factor de atenuación (α_b) entre 1.3 y 3.7 dB/m el cual se concentra alrededor de $\alpha_b = 2\text{dB/m}$. Las pérdidas debidas a un árbol por efectos de dispersión y de absorción según obtuvo en sus experimentos es de aproximadamente 13 dB [VII].

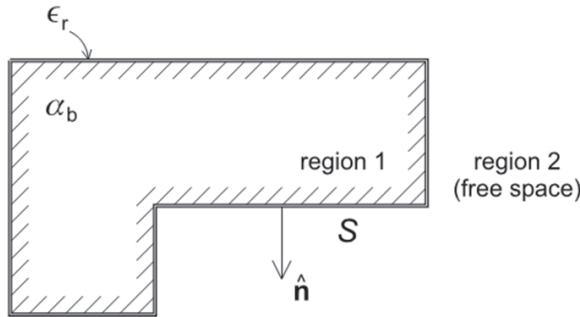
En el caso de la difracción externa por las esquinas de los edificios, se han usado los coeficientes de Taket y Burge [VIII], [IX].

Un importante beneficio del nuevo modelo de transmisión, es que automáticamente toma en cuenta la propagación de outdoor a indoor. Este modelo da buenos resultados para la penetración en edificios al nivel del suelo debido a su naturaleza bidimensional. Para las predicciones de la potencia radiada sobre los pisos más altos se debe usar un modelo diferente (modelos 3-D). Además los edificios son modelados como objetos infinitamente altos con sus laterales planas. Las caras son modeladas como finas placas con permitividad compleja uniforme efectiva ϵ_r y se asume que solo las coordenadas exteriores del

edificio son conocidas [X].

En la figura 2, se muestra la representación de un edificio que aísla dos regiones, una interna y otra externa al edificio, las cuales son separadas por una superficie cerrada 'S' la cual representa el muro exterior del edificio. El vector n es el vector unitario normal a la superficie que apunta a la región 2.

FIGURA 2. ESQUEMA del modelo para un edificio. Fuente: [VII]



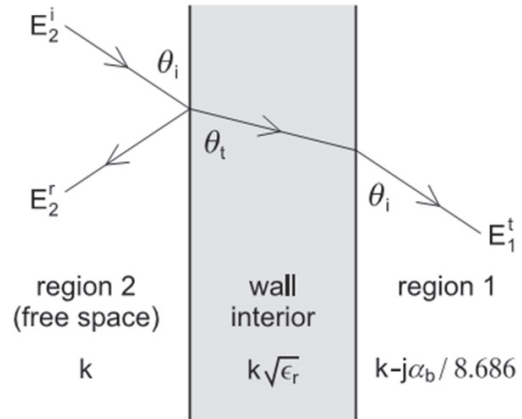
Este modelo complementa el modelo de trazado de rayos tradicional ya que adiciona los efectos de transmisión determinados por el coeficiente de permitividad ϵ_r , el cual permite la interacción de los campos externos sumados a los efectos de los campos internos los cuales son independientes entre sí. En este caso, debido a que no se tiene conocimiento de los materiales al interior del edificio, es imposible predecir la distribución exacta de los campos internos, en su lugar se intenta modelar un comportamiento global de los campos penetrados y transmitidos. El interior del edificio es modelado como un medio uniforme en el cual las pérdidas de propagación que se presentan pueden ser descritas por un factor de atenuación específico α_b , expresados en dB/m, y la velocidad de propagación es igual a la de espacio libre. Por consiguiente el comportamiento del campo dentro del edificio está descrito por la función de Green (4).

$$G_1(r, r') = \frac{e^{-jk_1|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \quad (4)$$

Donde, $k_1 = k - j\alpha_b / 8.686$. k = número de onda $2\pi/\lambda$ [rad/m].

La aplicación de los coeficientes de reflexión de Fresnel implica que una parte del campo incidente igual al coeficiente suave de transmisión de Fresnel T_2 es transmitido cruzando la cara más externa del muro. De este campo que resulta en el interior del muro, una parte es transmitida dentro del edificio (Región 1). Debido a que la parte imaginaria de k_1 es mucho menor que k el coeficiente de transmisión correspondiente puede ser escrito como T_1 (5) y la dirección de propagación del campo transmitido a través del muro es igual a la dirección del campo incidente [VII].

FIGURA 3. EFECTOS alrededor de un muro dieléctrico.



Fuente: [VII]

$$T_1 = \frac{2 \cos(\theta_t)}{\cos(\theta_t) + \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r} - \sin^2(\theta_t)}} \quad (5)$$

Y la transmisión de la región 1 a la región 2 resulta ser T_2 . Ecuación (6).

$$T_2 = \frac{2 \cos(\theta_i)}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2(\theta_i)}} \quad (6)$$

Los efectos de reflexión y dispersión al interior del muro son despreciados debido a que requiere de un conocimiento detallado del grosor y su estructura interna, también por simplicidad, las pérdidas dentro del muro no están incluidas en el coeficiente de transmisión, las pérdidas dentro del edificio están incluidas en el coeficiente de atenuación α_b . Entonces el coeficiente de transmisión efectivo a través de los muros resulta ser (7).

$$T(r) = 1 - R(r)^2 \quad (7)$$

Donde el coeficiente de reflexión es:

$$R(r) = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - (\sin \theta_i)^2}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - (\sin \theta_i)^2}} \quad (8)$$

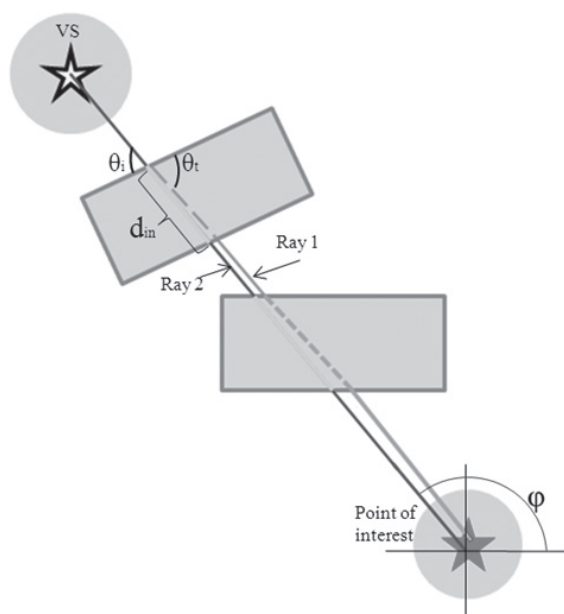
De acuerdo al modelo de transmisión descrito, las pérdidas totales por transmisión de edificios experimentado por el campo transmitido de geometría óptica es igual a la ecuación (9).

$$L_t(dB) = \alpha_b d_{in} - 20 * \log_{10} |T(r_1)| - 20 * \log_{10} |T(r_2)| \quad (9)$$

Donde d_{in} es la longitud de la trayectoria del rayo transmitido hacia dentro del edificio; $r1$ y $r2$ son los puntos de transmisión sobre la superficie del edificio, $T(r1)$ y $T(r2)$ son los coeficientes de transmisión asociados.

El factor de atenuación a_b fue seleccionado de tal forma que la raíz cuadrática media del error de la fórmula teórica L_c con respecto a los datos medidos promediados, es minimizada [VII]. Por otro lado, las pérdidas debidas a las difracciones mencionadas se calculan de acuerdo a los trabajos precedentes con base en la Teoría Uniforme de Difracción UTD (Uniform Theory of Diffraction) [XI] y [XII].

FIGURA 4. Esquema de la transmisión a través de edificios.



Fuente: Archivos RadioGis

3. ESTRATEGIA PARA AJUSTAR LOS PARÁMETROS

Se planteó la metodología de sintonización para el algoritmo de radiopropagación DeJong-RadioGIS esencialmente en tres etapas, cada una toma como variable un parámetro diferente para ser ajustado. Esto es, en la primera etapa se verifica el cumplimiento de la fórmula para determinar pérdidas en espacio libre, de donde se determina un valor de ajuste para la constante multiplicadora que modela las características del medio. Como segunda etapa, se realizan mediciones de ondas reflejadas en los muros de edificios para calcular las pérdidas por reflexión. Por último se realizan pruebas de refracción a través de los edificios y se mide la potencia

recibida para ajustar el coeficiente de atenuación por transmisión. La permitividad compleja y la conductividad son valores constantes seleccionados de acuerdo al modelo implementado por DeJong.

4. CAMPAÑA DE MEDICIONES

Se llevó a cabo tres campañas de medidas. Una se realizó en el estadio Primero de Mayo de la UIS con el fin de calcular el factor que modela las características del medio para pérdidas en el espacio libre. Para obtener los coeficientes de reflexión y transmisión se realizó la campaña de medidas en el laboratorio de alta tensión e Hidráulica de la UIS. Por último, con la campaña de medidas realizada en El Prado (Bucaramanga) se verificó el algoritmo DeJong-RadioGIS, comparando potencia recibida real con la que predice el algoritmo.

Para la medición de potencia recibida en cada uno de los puntos se utilizó un analizador de espectros (ROHDE&SCHWARZ ZVL Network Analyser) conectado a la antena móvil; las antenas receptora y transmisora usadas en esta campaña son del mismo modelo y están aproximadamente a la misma altura.

4.1 MEDICIONES EN ESPACIO LIBRE

En el estadio Primero de Mayo se realizó una campaña de medidas compuesta por cuatro rutas, cada una en línea recta con 5 puntos de medición separados 4.5 metros cada uno.

La potencia es transmitida por la estación base con antena omnidireccional HG1911U-PRO (Figura 7) es de 25dBm + 11 dBi (Ganancia del generador + Ganancia de antena). La frecuencia de la onda sinusoidal propagada en esta campaña fue de 1.883 GHz. La estación base está situada aproximadamente en el centro de la cancha como se aprecia en la Figura 5 a una altura de 2.6 metros. El esquema de rutas utilizado en la medición se muestra de la Figura 5, estas medidas se realizaron con el fin de caracterizar la constante de espacio libre, que será utilizado en posteriores campañas de medición para la verificación del algoritmo. La ecuación de pérdidas en el espacio libre (3) es teórica y puede diferir de las mediciones tomadas según las condiciones ambientales. El parámetro A en el algoritmo DeJong-RadioGIS corresponde al factor que modela las características climáticas del medio para el espacio libre en el entorno donde se realizan las medidas.

Con los datos de potencia recibida para los puntos de observación 1, 2, 3, 4 y 5, se promedia los puntos correspondiente para cada ruta, obteniendo un total de cinco potencias promedio, partiendo de los valores teóricos de la expresión (3), se ajusta el valor de A de tal forma que el error cuadrático medio sea mínimo. Finalmente se eligió un factor $A=6$ con el cual se redujo el error cuadrático medio hasta 1.77 dBm, y el algoritmo

DeJong-RadioGIS obtuvo las predicciones que se muestran en la curva de color azul oscuro de la Figura 6, ésta curva también se compara con la predicción del algoritmo sin el parámetro 'A' del ambiente, la cual se observa siguiendo la curva azul celeste.

FIGURA 5. Esquemas de rutas

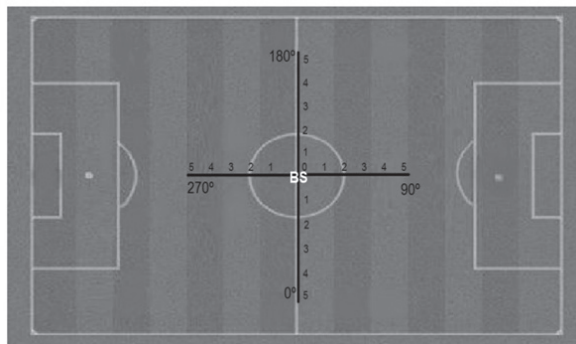


FIGURA 6. Ajuste de las pérdidas por espacio libre

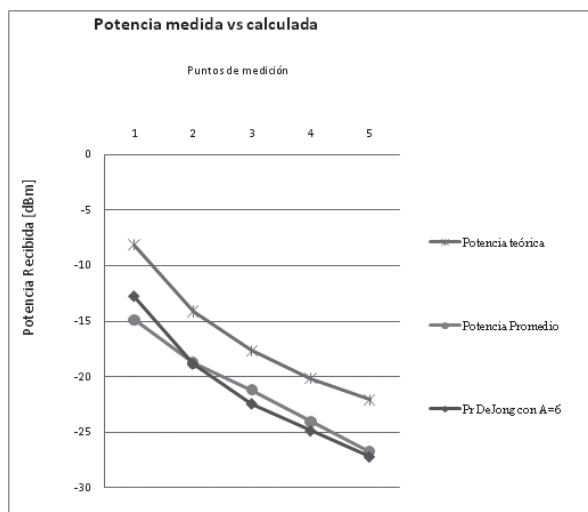
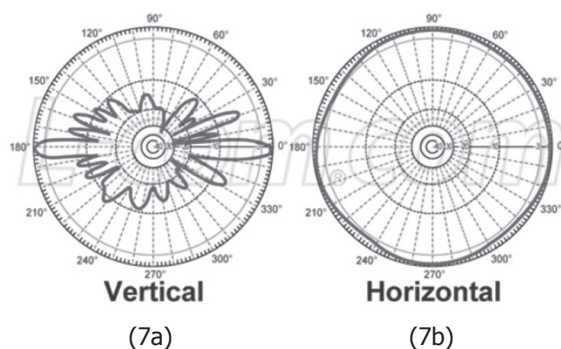


FIGURA 7. a) Patrón vertical (elevación) y b) Horizontal (azimut) de la antena HG1911U [XIII]



4.2 MEDICIÓN A TRAVÉS DE EDIFICIOS

Las pérdidas de potencia en un determinado punto de observación, cuando una onda transmitida por la estación base atraviesa un edificio, depende de factores como el material con el cual están construidas las paredes, el ángulo con el cual incide la onda en las paredes del edificio y unos factores dinámicos al interior de las edificaciones que no se pueden predecir, por lo tanto, estas edificaciones se consideran como cajas negras caracterizadas por un factor de atenuación efectivo.

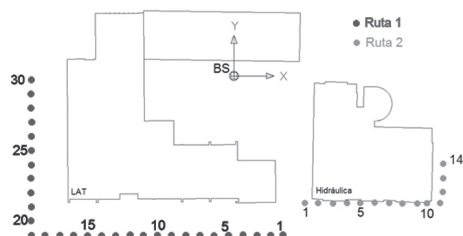
De acuerdo a los análisis y planteamientos realizados por Yvo DeJong se realizan pruebas en una zona semi controlada para el ajuste del factor de atenuación efectivo, inicialmente propuesto con un valor de $\alpha_b=2$ dB/m, el coeficiente de permitividad compleja $\epsilon_r=5$, y el de conductividad $\sigma=0$, se asumen pre establecidos en el algoritmo según los resultados de la tesis de DeJong.

Para esta campaña de medidas se realizaron dos rutas (ver Figura 8), la ruta 1 se realizó alrededor del edificio de alta tensión y la ruta 2 alrededor del edificio de Hidráulica, la distancia de separación entre cada punto adyacente de medida es aproximadamente 3 metros. Estas rutas se escogieron de la manera mostrada en la Figura 8, debido a que en la mayoría de estos puntos de observación las contribuciones por transmisión son las que principalmente determinan la potencia. Se dispone de un mapa detallado de las paredes externas estos edificios (ver Figura 9), para la ruta 1 se realizó el trazado de rayos correspondiente con el fin de obtener la distancia que atraviesa el edificio, la distancia en espacio libre y el ángulo de incidencia del rayo con respecto a la normal de la pared externa del edificio. Se utilizó un generador de señales SMB100A de la marca Rohde & Schwarz (R&S) transmitiendo a 25 dBm de potencia a la frecuencia de 1.9 GHz, un analizador de espectro ZVL-3 de R&S y un par de antenas compactas de banda ancha modelo HG2404CU cuyas especificaciones se detallan en la tabla 1. Se utilizó para la conexión de las antenas un par de cables LMR300 con conector tipo N macho-macho cuyas pérdidas registradas fueron 1.6 dBm en cada uno con fluctuaciones de ± 0.2 dBm.

Las características de las antenas son un aspecto importante a considerar ya que a través de ellas se puede lograr o no un buen enlace de onda electromagnética entre transmisor y receptor. Así mismo es importante observar el patrón de radiación y la polarización que presentan para determinar correctamente la ubicación y direccionamiento de las antenas. Se dispone en el laboratorio de un par de antenas compactas y fáciles de transportar que, aunque no son las óptimas, sirven adecuadamente para utilizarlas en las pruebas requeridas. Estas son de la marca HyperLink Wireless que permiten transmitir y recibir en un rango amplio de frecuencias desde 800 MHz hasta 3 GHz por eso son consideradas multifuncionales. Tienen una ganancia de 3.5 Dbi para montaje indoor en el techo o también outdoor teniendo en

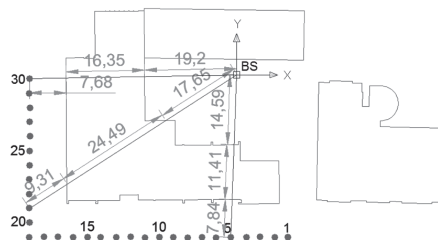
cuenta su patrón de radiación y considerando de que su polarización es vertical y lineal. Del diagrama presentado en las figuras 10 y 11, se puede deducir que la forma correcta de ubicarlas es de forma horizontal para obtener la máxima transferencia efectiva de energía, ya que hacia las puntas del eje vertical la radiación es mínima mientras que hacia los bordes del disco horizontal la radiación es máxima y uniforme en todos los ángulos de azimut.

FIGURA 8. Rutas de puntos medidos en la UIS



Fuente: Autor.

FIGURA 9. Distancias Ruta 1



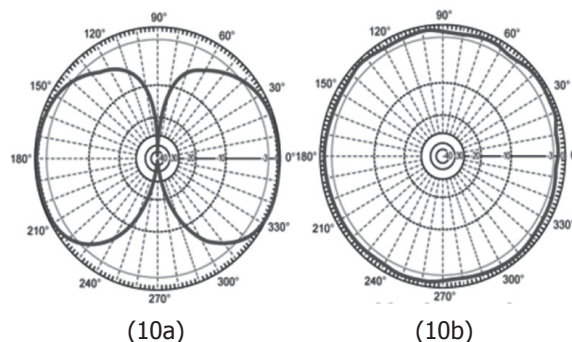
Fuente: Autor.

TABLA 1. Especificaciones de la antena HG2404CU

Frecuencias permitidas	de 0,8 a 3 GHz
Ganancia	3,5 dBi
Polarización	Vertical (Lineal)
Ancho vertical del haz	90°
Ancho horizontal del haz	360°
Impedancia	50 Ω
Potencia máxima de entrada	50 W
Peso	0,94 Lbs
Diámetro	180 mm
Alto	70 mm
Temperatura de operación	entre -40° a 85° C
Acata el RoHS	Si

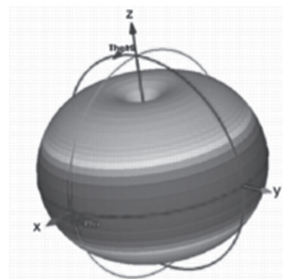
Fuente: [XIII]

FIGURA 10. a) Patrón vertical (elevación) y b) Horizontal (azimut) de la antena HG2404CU



Fuente: [XIII]

FIGURA 11. Diagrama 3D de la estructura de radiación de la antena



Para la obtención de datos, se trazaron 3 rutas punto a punto siguiendo algunas de las recomendaciones del método de Lee [XIV], [XV], para determinar la distancia entre cada punto, la cual se calcula como el resultado de 20 longitudes de onda, lo que corresponde en este caso a la ecuación (10).

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1.9 \times 10^9} = 0.15789 \text{ m} \quad (10)$$

$$\text{distancia} = 20 \times 0.16 \approx 3 \text{ m}$$

Donde ' λ ' es la longitud de onda, ' v ' es la velocidad de la onda, y ' f ' es la frecuencia. Según el método de Lee se recomienda que la distancia entre cada punto sea de aproximadamente 3 m.

Para cada medición se tuvo la precaución de verificar que no hubiese interferencia por otras fuentes adicionales alrededor de la frecuencia de 1.9 GHz. Adicionalmente se realizaron las pruebas durante las horas de bajo flujo de personas y poco tránsito en el área para evitar perturbaciones en la señal medida por agentes externos que podrían dificultar tener un ambiente controlado durante el experimento.

Se programó el analizador de espectro de tal forma que en cada punto de medición se realizó un promediado automático tomando 200 muestras instantáneas para cada frecuencia, teniendo un ancho espectral de 200 MHz con centro en 1.9 GHz, es decir, observando el espectro desde 1.8 GHz hasta 2 GHz y con una separación entre frecuencias de cada 1KHz.

TABLA 2. Altura de las antenas

ANTENA	Altura [m]
Transmisora	2,1
Receptora	1,8

TABLA 3. Algunos puntos medidos sobre la Ruta 1 Edificio LAT

N°	Angle_i	Coef. Reflexion	P. med. [dBm]	Pr.calculada [dBm]	Pr. Sim. [dBm]
1	17	-0,39725	-56,8	-63,185401	-55,2
2	13	-0,39084	-51,4	-62,408013	-55,5
3	8	-0,38530	-61,3	-62,038238	-55,8
4	3	-0,38243	-54,2	-61,809694	-59,9
5	2	-0,38217	-58,6	-66,805103	-66,1
6	7	-0,38452	-65,9	-66,949369	-69,77
7	12	-0,38952	-72,3	-67,590861	-71,63
8	17	-0,39725	-77,4	-68,332398	-72,63
9	22	-0,4078	-75,5	-69,348333	-74,73
10	26	-0,41853	-70,6	-70,508245	-75,73

TABLA 4. Algunos puntos medidos sobre la ruta 2, Edificio Hidraulica

N°	Coef. Reflexion	Pr. medida. [dBm]	Pr.calculada [dBm]	Pr. Simulada. [dBm]
1	0	-0,381966011	-59,6	0
2	55	-0,567797952	-61,8	55
3	51	-0,538282885	-57,7	51
4	47	-0,51200183	-57,8	47
5	44	-0,494272507	-64,9	44
6	41	-0,478137855	-56,7	41
7	38	-0,463510359	-64	38
8	36	-0,454555443	-63,2	36
9	34	-0,4462113	-64	34
10	32	-0,438456515	-69	32

En la Tabla 3 se presentan las Potencias medidas con el instrumento analizador espectral (P. med. en dBm), obtenidas en cada uno de los puntos, junto con la estimación de potencia (Pr. calculada en dBm) punto a punto aplicando la fórmula teórica del modelo como base de comparación. Se muestra el ángulo de incidencia de los rayos en las paredes externas del edificio (Angle_i en grados); el coeficiente de reflexión (Coef. Reflexión) calculado tomando como parámetro de entrada el ángulo Angle_i y la constante de permitividad general para edificios $\epsilon_r=5$; y la potencia recibida simulada (Pr. simulada en dBm), empleando la herramienta DeJong-RadioGIS, la cual no tiene en cuenta el ángulo de incidencia debido a su complejidad computacional, pero se espera poder incluirlo en un próximo avance.

El algoritmo DeJong RadioGIS no hace uso del ángulo de incidencia para el cálculo de las pérdidas por reflexión sino que simula esta pérdida por medio de un parámetro constante llamado pérdidas_por_reflexión el cual debe ser sintonizado. Por esta razón es necesario realizar un promediado de los coeficientes de reflexión y con este calcular la pérdida de potencia media cada vez que una onda es reflejada por alguna pared de los edificios en la zona de radiación, para realizar esta labor en los datos de la Tabla 3 se usó la siguiente ecuación (11):

$$Losses_{Refl.Promedio} = 20 * LOG_{10} \left(ABS(\text{promedio}(\text{Coef. Reflexión})) \right) = -7.26 \text{ dB} \quad (11)$$

Del mismo modo, para el cálculo de las pérdidas por transmisión de edificios se utilizó la ecuación (12) que se presenta a continuación.

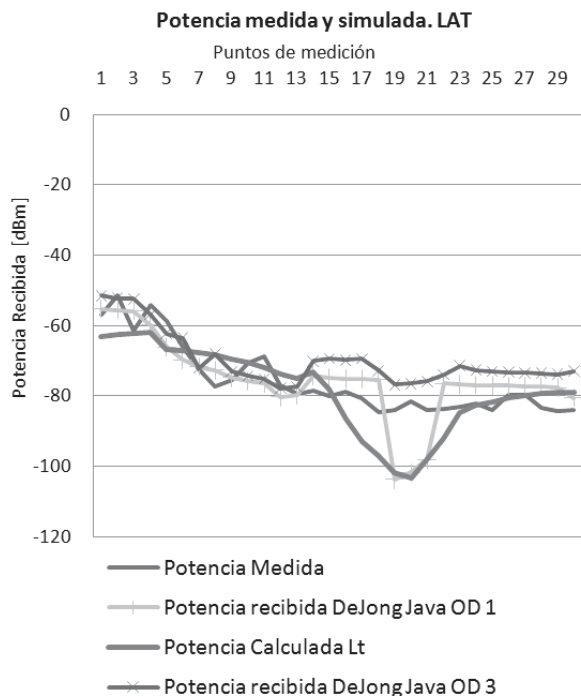
$$Losses_{Trans.Promedio} = 20 * \log_{10} \left(1 - (\text{promedio}(\text{Coef. Reflexión}))^2 \right) = -1.88 \text{ dB} \quad (12)$$

Un parámetro de gran importancia para el proceso de sintonización del algoritmo es α_b , el cual se define como una pérdida dada en [dB/m] y la cual puede variar entre un edificio y otro, sin embargo por estudios realizados en más de 20 edificaciones [VII], se llegó a la conclusión que un valor de 2 dB/m resulta adecuado para la mayoría de edificios modernos; sin embargo este parámetro puede cambiar de una estructura a otra, y la predicción es muy sensible a estos cambios, por tales motivos inicialmente asumiremos que α_b es igual a 2 dB/m y dependiendo de la situación se decidirá si es mejor aumentar o disminuir dicho valor para aproximar de mejor manera la predicción a los resultados esperados.

Una vez sintonizado el algoritmo con el factor 'A', hallado empíricamente en las pruebas de espacio libre, el factor α_b y los parámetros calculados anteriormente, se simuló y se obtuvo los resultados de la Figura 12. En

color rojo aparecen los datos reales medidos, en color azul la curva de potencia predicha por un algoritmo de prueba realizado como respaldo a los resultados, en color verde los resultados de simulación predichos por el algoritmos DeJong-RadioGIS cuando se elige orden de descendencia de rayos igual a uno y finalmente, en color morado se muestra la misma simulación pero con un orden de descendencia de rayos igual a tres.

FIGURA 12. Resultados de medición, cálculo y simulación para LAT



Para medir la variación de cada una de las curvas respecto a los datos medidos en campo, se utilizó como parámetro de comparación el error cuadrático medio, de esta forma el resultado obtenido para cada una de las curvas es como se muestra en la Tabla 5 donde se calcula el error cuadrático medio para todos los puntos de la curva en color azul de la Figura 12 correspondiente a los cálculos manuales teniendo en cuenta el ángulo de incidencia. Seguidamente se muestra en la segunda fila el valor de 5.25 dB correspondiente al error cuadrático medio a partir de las mismas curvas pero despreciando las mediciones con potencia menor a -80dBm, ya que por sensibilidad del instrumento de medición, en -80dBm es donde se encuentra el piso de ruido visualizado en el analizador de espectros y por estas razón estos valores no pueden ser comparados. Las filas 3 y 4 de la misma tabla presentan el error cuadrático medio para la curva en color verde de la Figura 12, en esta se realizó la simulación en el algoritmo DeJong-RadioGIS utilizando

un orden de descendencia igual a uno, finalmente se aplicó la misma fórmula para el error pero descartando los datos con potencia inferior a -80dBm, finalmente se realizaron los mismos cálculos pero con un orden de descendencia de rayos igual a tres, dando un valor de error igual a 7,45 dB.

TABLA 5. Cálculo del error medio cuadrático para las curvas de la Figura 12

Curva Analizada y condiciones	Error rms [dB]
Error promedio con todos los datos calculado punto por punto (ppp)	8,12
Error Promedio discriminando datos < -80dBm (cálculos ppp)	5,24
Error Promedio usando DeJong_OD1	7,86
Error Promedio discriminando datos < -80dBm (usando DeJong_OD1)	7,55
Error Promedio usando DeJong_OD3	7,79
Error Promedio discriminando datos < -80dBm (usando DeJong_OD3)	7,45

De la Figura 12 y la Tabla 5 se puede observar que los parámetros de sintonización seleccionados hasta el momento funcionan bien para el edificio de LAT, sin embargo, con el fin de intentar mejorar esta sintonización o al menos verificar su óptimo funcionamiento, el proceso realizado con LAT se realizará para el edificio de Hidráulica que se muestra en la Figura 8 con la respectiva ruta de mediciones.

En la Tabla 4.5 se presentan las medidas de potencia (P_m en dBm), obtenidas en cada uno de los puntos de la ruta 2 Figura 8, para simular las características del edificio Hidráulica. En la Tabla 4 se muestra también el ángulo de incidencia de los rayos en las paredes externas del edificio ($Angle_i$ en grados); el coeficiente de reflexión (Coef. Reflexión) calculado tomando como parámetro de entrada el ángulo $Angle_i$ y la constante de permitividad $\epsilon_r=5$. Finalmente se muestra la potencia simulada ($P_{simulada}$ en dBm) en cada uno de los puntos de la ruta 2, empleando la herramienta DeJong-RadioGIS.

Para poder dar un parámetro en cuanto a pérdidas por reflexión al algoritmo DeJong-RadioGis, se realiza un promediado de los coeficientes de reflexión obtenidos a partir de los cálculos manuales punto a punto y de ahí se calcula la pérdida de potencia media de la misma forma que se hizo para el caso del edificio LAT. De las fórmulas 11 y 12 se obtiene el resultado de las pérdidas promedio en reflexión que resulta en

$$Losses_{Refl_{promedio}} = -6,725 \text{ dB}$$

Y las pérdidas promedio en transmisión dan:

$$Losses_{Trans.Promedio} = -2,076 \text{ dB}$$

Se observa que los valores para el coeficiente de reflexión del edificio de Hidráulica relacionados con los del edificio LAT no varían significativamente. Se consideró válidos los parámetros de pérdida por reflexión y pérdida por transmisión obtenidos en fórmulas (11) y (12). Entonces se alimenta el algoritmo con un valor del parámetro $perdidas_por_transmisión = -1.88$ y teniendo en cuenta la relación directa que hay entre los coeficientes de reflexión y de transmisión tal como indica (7) y (8). Luego se ejecutó la simulación para la ruta 2 alrededor del edificio de Hidráulica, dando como resultado la gráfica 13.

FIGURA 13. Resultados de medición, cálculo y simulación para el edificio de Hidráulica

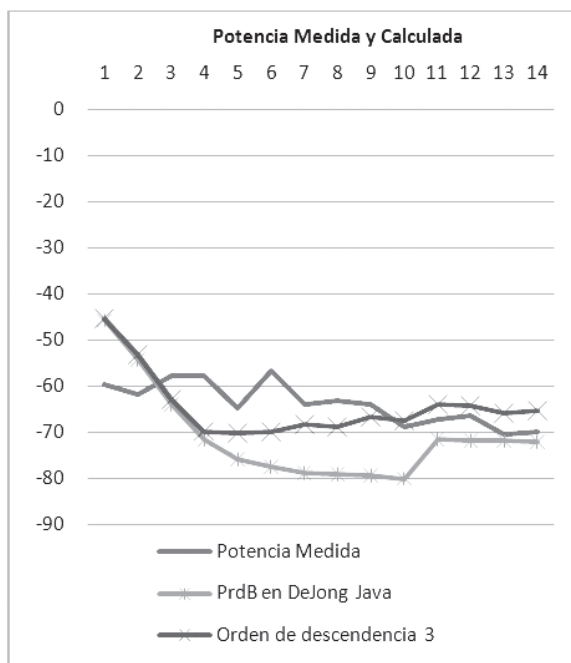


TABLA 6. Cálculo del error medio cuadrático para las curvas de la Figura 13.

Curva Analizada y condiciones	Error Cuadrático medio
Error Prom DeJong_OD1	11,72 [dB]
Error Prom DeJong_OD3	7,39 [dB]

De la Figura 13 y la Tabla 6 se puede observar que los parámetros de sintonización seleccionados hasta el momento funcionan adecuadamente para el edificio de Hidráulica, se observa además que para orden de descendencia 3 el error disminuye.

A continuación se presentan los resultados de verificación definitiva en una zona urbana común de Bucaramanga con muchas variables aleatorias y dinámicas que ponen a prueba la aplicabilidad del algoritmo DeJong-RadioGIS en entornos urbanos como los encontrados en ciudades de Colombia.

La Figura 14 muestra una vista superior de la zona de medición en el barrio el Prado de Bucaramanga, los puntos que conformaron las rutas en las que se realizaron las respectivas mediciones y la ubicación de la estación base desde donde se estaba transmitiendo la señal electromagnética de prueba. Se definieron 4 cuatro rutas de medición, cada una con un color diferente, que se expanden por nueve manzanas de apartamentos, casas y edificios donde será posible evaluar los diversos medios de transmisión electromagnética contemplados por el algoritmo DeJong-RadioGIS y hacer de este modo una evaluación final al comportamiento del mismo.

En las Figuras 15 hasta la 18 se muestran los respectivos gráficos de las curvas con los puntos medidos y los puntos simulados por el algoritmo ajustado.

En primera instancia se analizan los datos obtenidos en la ruta número uno, que se muestra de color Amarillo en el mapa. En este caso el efecto dominante para la mayor parte de los puntos es la transmisión a través de las edificaciones, la gráfica comparativa correspondiente se muestra en la Figura 4.9, se aprecia que el algoritmo predice con una alta cuota de exactitud los valores medidos, excepto cuando la potencia que debería medir el analizador está por debajo de -80 dB, en estos casos el error se incrementa de manera significativa y las predicciones del algoritmo se salen de contexto.

Al realizar el cálculo del error cuadrático medio para los datos tabulados de la figura 15 se obtiene un error de 18.74 dB, lo cual es inaceptable para un modelo de radiopropagación. Sin embargo, mientras no se tengan en cuenta los datos en los cuales el algoritmo predice potencias inferiores -80 dB para el cálculo del error, el escenario cambia totalmente, y se pasa de tener errores por el orden de 20 dB a tener un error de 4.67 dB. Queda en evidencia el hecho de que las mediciones se ven sesgadas cuando la predicción del algoritmo para la potencia que recibe el analizador de espectros está por debajo del umbral de -80 dBm, en este caso el problema es la sensibilidad el receptor, es decir que el piso de ruido en el analizador es mayor que la señal, y en ese escenario, la potencia que ve el analizador es realmente la superposición de la potencia del ruido, con la potencia de la señal radiada lo cual explica el error existente cuando el algoritmo predice potencias inferiores a -80 dB.

FIGURA 14. Zona de medición edificios, barrio El Prado. Vista superior



TABLA 7. Calculo del error cuadrático medio para la ruta 1 (Amarilla)

Error rms p>-80dB	4,668 [dB]
Error rms indiscriminado	18,746 [dB]

FIGURA 15. Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta Amarilla

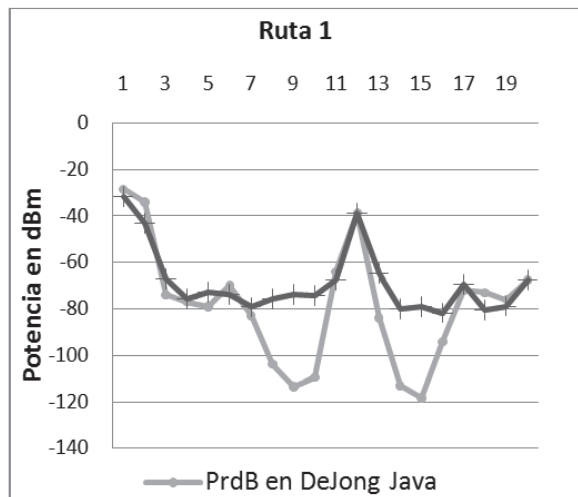


TABLA 8. Error cuadrático medio calculado en la ruta 2, color rojo

Error rms p>-80dB	7,230 [dB]
Error rms indiscriminado	33,076 [dB]

FIGURA 16. Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta Roja

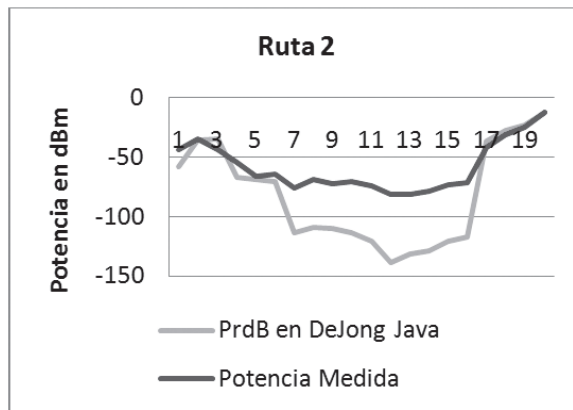


TABLA 9. Error cuadrático medio calculado en la ruta 3, (puntos Azul)

Error rms p>-80dB	6,775 [dB]
Error rms indiscriminado	38,484 [dB]

FIGURA 17. Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta Azul

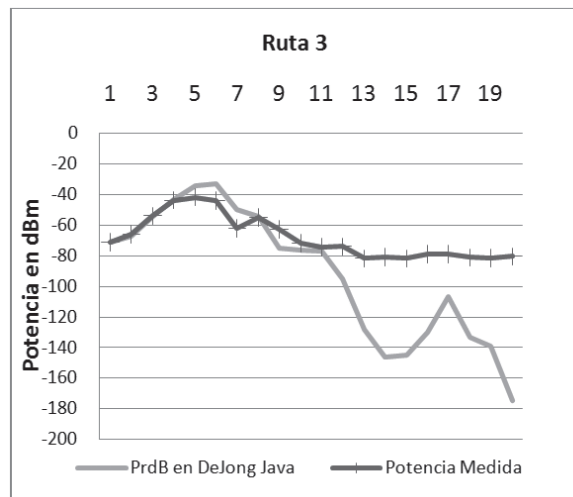
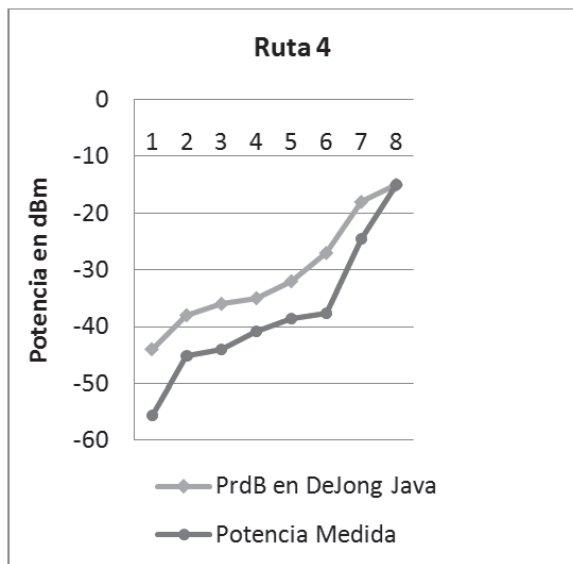


TABLA 10. Error cuadrático medio calculado en la ruta 4, color Verde

Error rms p>-80dB	7,828 [dB]
Error rms indiscriminado	7,828 [dB]

FIGURA 18. Comparación de resultados medidos vs simulados en la ruta verde



5. CONCLUSIONES

El analizador de espectros no permite mostrar una potencia recibida menor a su sensibilidad (piso de ruido), esto demostró ser el factor que mayor efecto tiene en el error cuadrático medio entre los resultados medidos y los que predice el modelo.

Aunque en el momento se cuenta con un algoritmo que se encuentra en fase de desarrollo, puede observarse que los resultados predichos por el modelo implementado muestran un comportamiento similar a los resultados obtenidos en las campañas de medida obteniendo un error rms de 7,4 dB teniendo en cuenta sólo las muestras donde los valores calculados computacionalmente están por encima del piso de ruido registrado por el instrumento de medición, que en este caso son los valores de potencia mayores a -80dBm. Este error cuadrático medio puede ser mejorado si se implementa el cálculo automático del ángulo de incidencia, según lo demuestran los cálculos realizados teniendo en cuenta ángulo de incidencia para cada fenómeno de refracción a través de edificios, ya que este experimento detallado arroja un error rms de 5,2 dB. Comparando los resultados con los que presenta DeJong en su tesis, se concluye que el error obtenido en las mediciones con el algoritmo DeJong-RadioGIS se mantienen en la mayoría de casos cercanos en magnitud al calculado por Yvo De Jong, quien presenta un error rms alrededor de 3 dB, con un error máximo promedio de 6 dB para cierta clase de edificios poco homogéneos en su interior.

El cambio de antena a una de mayor ganancia implica transmitir una onda más direccionada, lo que no

presenta inconveniente ya que las antenas transmisora y receptora están ubicadas a la misma altura, con lo que se puede aprovechar completamente la ganancia del transmisor. El alcance de la onda transmitida fue de 300 metros de radio aproximadamente en zona urbana, lo cual es común para antenas de micro celdas, y de cierto modo se consideró esta característica como una ventaja teniendo en cuenta que se quiere limitar el experimento a un espacio reducido y en lo posible aislado para poder tener más control sobre el escenario.

A pesar de que no ha sido implementado en el algoritmo el fenómeno de dispersión ni tampoco el cálculo automático del ángulo de incidencia en muros, puede observarse de las mediciones en zonas exigentes y heterogéneas como en el barrio El Prado, que el efecto de error introducido por esta causa no fue tan significativo en la mayor parte del área de medición gracias a que se hizo un ajuste empírico de los coeficientes de reflexión y refracción, los cuales en la fórmula original dependen del ángulo de incidencia; pese a esto, se debe señalar que el hecho de incluir el ángulo de incidencia y la dispersión en una versión futura del algoritmo, influirá directamente en la exactitud de las predicciones y reducirá el error.

Se ha logrado que el costo computacional para realizar los cálculos de simulación sea bastante menor y el tiempo de ejecución se redujo en el orden de minutos comparado con los modelos en 3-D. Lo que se debe lograr en adelante es demostrar que la precisión de los resultados sea igual o mayor que otros modelos, tomando como referencia algunos programas comerciales como ICS Telecom[XV] y Mentum Planet[XVI].

Se logró trabajar en un espacio abierto a una altura de 2 metros sobre un suelo con césped y se observó que el decaimiento de potencia en la trayectoria de propagación cumple el comportamiento descrito por la fórmula teórica respectiva agregándole una corrección de potencia constante que está determinado por un factor que depende de las características del entorno.

6. REFERENCIAS

- [I] Comisión de Regulación de telecomunicaciones, "Informe Trimestral de Conectividad", Bogotá, no. 14, pp. 8, Marzo 2009.
- [II] EL TIEMPO, "Colombia completó 40.7 millones de líneas activas de celular en el 2008", Bogotá, Marzo 2009.
- [III] PÉREZ FONTÁN, F. and MARIÑO ESPÍÑEIRA, P. "Modeling the Wireless Propagation Channel". Wiley. 2008.
- [IV] DE JONG, Y.L.C. and HERBEN, M.H.A.J. "Accurate identification of scatterers for improved microcell propagation modelling," in Proc. 8th IEEE

- Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'97), Helsinki, Finland, 1997, vol. 2, pp. 645–649.
- [V] RIZK, K. WAGEN, J.-F. and GARDIOL, F. "Two-dimensional ray tracing modeling for propagation prediction in microcellular environments," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 46, no. 2, pp. 508–518, Mayo 1997.
- [VI] DE JONG, Y.L.C. and HERBEN, M.H.A.J. "Experimental verification of ray-tracing based propagation prediction models for urban microcell environments", in Proc. IEEE 50th Veh. Technol. Conf. (VTC'99–Fall), 1999, vol. 3, pp. 1434–1438.
- [VII] DE JONG, Y.L.C., "Measurement and Modelling of Radiowave Propagation in Urban Microcells," Technische Universiteit Eindhoven, ISBN 90-386-1860-3, 2001.
- [VIII] TAKET, N.D. and BURGE, R.E. "A physical optics version of the geometrical theory of diffraction," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 39, no. 6, pp. 719–731, Junio 1991.
- [IX] BURGE, R.E. YUAN, X.-C. CAROLL, B.D. FISHER, N.E. HALL, T.J. LESTER, G.A. TAKET, N.D. and OLIVER, C.J. "Microwave scattering from dielectric wedges with planar surfaces: a diffraction coefficient based on a physical optics version of GTD," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 47, no. 10, pp. 1515–1527, Oct. 1999.
- [X] DE JONG, Y.L.C.; KOELEN, M. and HERBEN, M. "A Building-Transmission Model for Improved Propagation Prediction in Urban Microcells," IEEE Trans. Veh Technol., vol. 53, no. 2, Marzo 2004.
- [XI] RECOMMENDATION ITU-R P.526-8, Propagation by diffraction, ITU, 2003.
- [XII] ERCEG, V. RUSTAKO, A.J. and ROMAN, R.S. "Diffraction around corners and its effects on the microcell coverage area in urban and suburban environments at 900 MHz, 2 GHz, and 6 GHz," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 43, no. 3, pp. 762–766, Agosto 1994.
- [XIII] Datasheet. HyperLink Wireless brand. Model HG2404CU and HG1911U. Disponible en: www.l-com.com.
- [XIV] DE LA VEGA, David; LÓPEZ, Susana; MATÍAS, Jose María; GIL, Unai, PEÑA, Iván. Generalization of the Lee Method for the Analysis of the Signal Variability. IEEE Transactions on vehicular technology. Vol 58, No. 2, Febrero de 2009.
- [XV] LEE, W. C. Y. Mobile Communications Design Fundamentals. Indianapolis, IN: Sams, 1986.
- [XVI] GRENIER, Emmanuel. Signal propagation modeling in Urban Environment, White Paper. ATDI, 2005.
- [XVII] Ver: www.mentum.com, Diciembre de 2010.