

# 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

A. Paolo García A.

Universidad Industrial de Santander - GTI-UIS-E<sup>3</sup>T  
paolo\_1@ieee.org

Homero Ortega B.

Universidad Industrial de Santander - GTI-UIS-E<sup>3</sup>T  
hortegab@uis.edu.co

Andrés Navarro C.

Universidad Icesi-I2T  
anavarro@icesi.edu.co

Alexys H. Rodríguez A.

Universidad Industrial de Santander  
alexys\_6@yahoo.es

## RESUMEN

El presente artículo hace parte del desarrollo de un algoritmo que considera la influencia del relieve en la propagación electromagnética para un entorno semi-urbano, trabajando en la banda de UHF (300MHz-3GHz) utilizada en los actuales y futuros sistemas de comunicación inalámbricos (i.e. 800-900MHz en sistemas DAMPS/US-TDMA/IS-136 y GSM). El modelo base, el COST231-Walfisch-Ikegami, empleado en la investigación, demostró beneficios, junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las Herramientas de Planificación, para el desarrollo de los estudios de propagación, estimación de coberturas y análisis de los principales factores que afectan la plani-

ficación de un sistema móvil celular. Aquí se describen los conceptos básicos utilizados para el desarrollo del algoritmo aplicado, las consideraciones sobre las cuales se llevaron a cabo las campañas de medidas y el proceso de validación de resultados que comprueban la utilidad del algoritmo desarrollado para la predicción de Path Loss. El trabajo se basó en la fusión del modelo de propagación *COST231-Walfisch-Ikegami* con la *Herramienta de Planificación Cell-View* (fundamentada en el SIG ArcView) y la realización de mediciones en la ciudad de Bucaramanga con una unidad móvil de radiocomunicación y control del espectro radioeléctrico de propiedad del Ministerio de Comunicaciones de Colombia, seccional

Bucaramanga. El estudio llevado a cabo para la banda del sistema IS-136, mostró resultados de simulación y validación que permiten corroborar las aproximaciones empleadas.

#### **PALABRAS CLAVES**

Walfisch-Ikegami, GIS, CellView, modelos de propagación, Path Loss, difracción, zonas de Fresnel, sistemas móviles e IS-136.

#### **ABSTRACT**

This paper is aimed to develop an electromagnetic propagation algorithm considering the influence of mountain terrain in UHF (300MHz-3GHz) band for wireless communications systems (i.e. 800-900MHz in DAMPS/US-TDMA/IS-136 and GSM standard). The Model COST 231-Walfisch-Ikegami used in this investigation proved, together with Geographic Information System (GIS) and prediction tools for mobile propagation, to facilitate propagation studies, coverage analysis and analysis of main factors for cell planning in mobile systems.

The paper describes the basic concepts used to design the algorithm, the parameters used in measure-

ments and results analysis in order to verify its applicability in cellular coverage prediction. The studies have been done by the research group GTI (Grupo de Investigación en Telecomunicaciones e Informática) of Universidad Industrial de Santander (UIS) together with Universidad Icesi, both in Colombia, in cooperation with Valencia Technical University, in Spain. Measures have been done initially in Bucaramanga, a city located in the Andean Mountain system, for IS-136 band system. Coverage predictions have been done using a locally modified version of CellView, a GIS based Planning tool developed by the Valencia Technical University, and the measurements was done using portable monitoring unit (i.e. Miniport Receiver EB200-Rohde&Schwarz from 10kHz-3GHz) in cooperation with the Ministry of Communications Bucaramanga-Colombia.

#### **KEYWORDS**

Walfisch-Ikegami, GIS, CellView, propagation models, Path Loss, diffracción, Fresnel zones, mobile planning, IS-136.

**Clasificación:** A

## INTRODUCCIÓN

Los algoritmos para la predicción de pérdidas por trayectoria o *Path Loss*, en la propagación de ondas electromagnéticas para la planificación avanzada de sistemas de comunicación inalámbricos, deben hacer consideraciones respecto a los efectos del ambiente y los obstáculos sobre los cuales ocurre la propagación, como lo son edificios, calles, árboles, montañas, etc., entre las radio bases y los abonados móviles. Pocos estudios se han llevado a cabo para un ambiente urbano afectado por terreno ondulado, en condiciones como la región andina, con amplia presencia de colinas. Gracias a la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica y a las herramientas de planificación se puede obtener más eficiencia a la hora de analizar los resultados de un modelo como el COST231-Walfisch-Ikegami [10] en condiciones urbanas no uniformes sobre terreno escarpado, como ocurre en ciertos sectores de la ciudad de Bucaramanga.

En Colombia y en los países de la región andina, las ciudades comúnmente se han construido sobre terreno ondulado, habiendo así presencia de colinas, valles y edificios en un mismo entorno. Por lo anterior, la propagación de radio se ve afectada por cada uno de estos parámetros de forma diferente. Se han escrito varios trabajos alrededor del tema [3], [9] y [12], entre otros, pero la mayoría se enfocan a un tipo de ambiente en especial ya sea urbano, rural o afectado por montañas. En [3] y [12] se hacen postulaciones para ambientes urbanos en terreno montañoso, pero solo en [12] se plantea un modelo general aunque no se ha verificado. En el presente trabajo se valoró la pro-

pagación electromagnética sobre edificios y calles, en varios perfiles de terreno, con el fin de estimar los factores que introducen la variabilidad en la señal transmitida entre dos puntos. Se consideró conveniente hacer uso del modelo *Cost231-Walfisch-Ikegami* [10], una modificación de los modelos *Walfisch-Bertoni* [8] e *Ikegami* [11]. Este modelo considera la orientación de las calles permitiendo obtener mejores aproximaciones en entornos urbanos.

El uso de una herramienta de planificación celular como CellView, desarrollada por el Grupo de Comunicaciones Móviles de la Universidad Politécnica de Valencia, permitió realizar las simulaciones con otros modelos de propagación, aprovechando la información cartográfica digital existente, editada y creada de la ciudad de Bucaramanga. Además, el uso del CellView permitió enlazar el nuevo modelo a la herramienta, el COST231-Walfisch-Ikegami, admitiéndose de esta manera la realización de nuevas consideraciones topográficas en las simulaciones, gracias a la versatilidad de su plataforma GIS.

Con el fin de confrontar los resultados de simulación con una situación real, se realizaron mediciones en campo haciendo uso del sistema celular actualmente instalado en Colombia, el DAMPS/US-TDMA/IS-136, (i.e: [14]). En esta etapa del estudio se contó con el apoyo del Ministerio de Comunicaciones de Colombia Seccional Bucaramanga y sus Unidades de Radiocomunicación, Monitoreo y Control del Espectro Radioeléctrico, las cuales permiten obtener información en áreas precisas en cuanto a ubicación (por me-

dio de GPS), ancho de banda, intensidad (en dB  $\mu\text{V}/\text{m}$ ), potencial (en dB  $\mu\text{V}$ ) y desplazamiento en frecuencia de la señal analizada.

La importancia de esta investigación aplicada se verá reflejada en el desarrollo de los sistemas móviles 2G, 2,5G y 3G [7], donde se debe buscar solución al desempeño del mecanismo de acceso (parámetros que afectan la interfaz aire) y el ancho de banda disponible para las aplicaciones, que dependen en gran medida del entorno en que se lleva a cabo la propagación. La aplicación futura de este desarrollo, y similares, permitirá a los operadores de telefonía móvil minimizar costos, maximizar el cubrimiento y mejorar la calidad del servicio, y a los entes reguladores, estimar el impacto de las tecnologías aplicadas (como la contaminación electromagnética), ejercer controles y establecer parámetros para la adecuada distribución del espectro electromagnético en cada país que presente condiciones topográficas similares a las andinas.

### EL MODELO COST 231 WALFISCH-IKEGAMI

Antes de profundizar en los conceptos utilizados para el desarrollo del algoritmo implementado en la investigación, se debe realizar un detallado estudio del modelo utilizado (i.e. [10]) y los factores que envuelven su comportamiento físico.

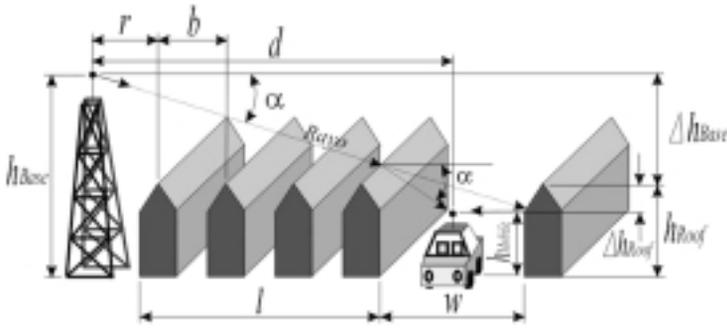
En este caso, el modelo Walfisch-Bertoni [8] ha sido combinado con el modelo de Ikegami [11] para considerar la difracción descendente hasta el nivel de las calles y algunos factores empíricos de corrección para incorporar acuerdos, con referencia a mediciones, resumidos en un único mode-

lo, basándose además, en las diferentes contribuciones de los miembros del "COST 231 Subgroup on Propagation Models", dando como resultado el modelo COST231- Walfisch-Ikegami. Este modelo permite incorporar a la estimación de Path Loss más parámetros que describen las características de un ambiente urbano, estos son: alturas de edificios ( $h_{\text{Roof}}$ ), ancho de las calles ( $w$ ), separación entre edificios ( $b$ ) y orientación de las vías ( $\phi$ ) respecto al trayecto directo de radio entre la Estación Base (BS) y el Abonado Móvil (MS). Los parámetros se definen en las Figuras 1 y 2. Sin embargo, este modelo es aún de tipo estadístico y no determinístico, ya que sólo puede considerar valores característicos del entorno y no valores específicos provenientes de bases de datos topográficas, lo cual conllevó a la realización de aproximaciones y promedios durante el diseño del algoritmo para el cálculo del Path Loss basados en el GIS de Bucaramanga.

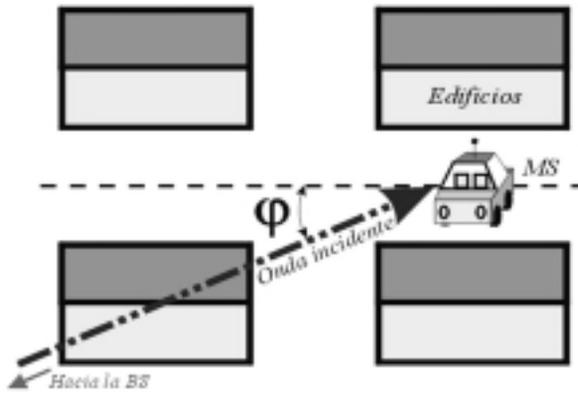
El modelo distingue entre las situaciones en las que hay línea de vista (*line-of-sight: LOS*) y en las que no la hay. En el caso de LOS se aplica una fórmula simple para las pérdidas de propagación, diferente a la aplicada en el caso de espacio libre. Esta se basa en mediciones llevadas a cabo en la ciudad de Stockholmo y está dada por:

$$L_b \text{ (dB)} = 42.6 + 26 \log(d) + 20 \log(f) \quad (1)$$

para  $d \geq 20\text{m}$ ,  $d$  expresada en km y  $f$  expresada en MHz. Para condiciones NLOS (sin línea de vista) el total de pérdidas está dado por:



**Figura 1.** Parámetros del modelo. Geometría en terreno plano.



**Figura 2.** Parámetro de orientación.

$$L_b = L_o + L_{rts} + L_{msd} \text{ para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \quad (2)$$

$$L_o (dB) = 32.4 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (3)$$

donde  $L_o$  son las pérdidas por espacio libre,  $L_{msd}$  son las pérdidas por difracción de múltiples filos de cuchillo antes del techo del edificio final y  $L_{rts}$  (*roof-top-to-street*) las pérdidas debidas a una única difracción final hacia el nivel de la calle, ocasionada por el techo del último edificio, y un proceso de dispersión ocurrido a esta altura.  $L_b$  dará un valor mínimo de  $L_o$  cuando  $L_{rts} + L_{msd} \leq 0$  y en otros casos puede llegar a ser negativo. Las pérdidas por espacio libre están dadas por:

para  $d$  expresada en km y  $f$  expresada en MHz. Un análisis detallado para la obtención de (3) y varias de las ecuaciones presentadas a continuación puede encontrarse en [1] y [2].

La determinación de  $L_{rts}$  se basa principalmente en el modelo de Ikegami, teniendo en cuenta el ancho de las calles y su orientación. Sin embargo, el COST 231 aplicó otra función de orientación para las vías, diferente a la de Ikegami, resultando en:

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log(w) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_{Mobile}) + L_{Ori} \quad (4)$$

donde  $w$  es la distancia entre las caras de los edificios ubicados a los lados de la calle donde se encuentra el MS, típicamente  $w \approx b/2$  y se expresa en metros,  $f$  en MHz y  $\Delta h_{Mobile}$  en metros. El término final de (4) considera la orientación de las calles a un ángulo  $\varphi$  según como se indica a continuación.

$$L_{Ori} = \begin{cases} -10 + 0.354 \varphi \rightarrow 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) \rightarrow 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55) \rightarrow 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

además

$$\Delta h_{Mobile} = h_{Roof} - h_{Mobile} \quad (6)$$

La formulación electromagnética escalar de la difracción debida a múltiples filos de cuchillo conlleva a una integral denominada Integral de aproximación de Kirchhof-Huygens (una descripción detallada de esta integral se puede encontrar en [1, 5]) a la cual Walfisch y Bertoni publicaron una solución aproximada dada en [8], para el caso en que la antena de la BS se encuentra por encima de la altura de los techos de los edificios. Este resultado de aproximación es extendido por el COST 231 para los casos en que la altura de la antena se encuentra por debajo de los techos de los edificios y para ello utilizan una función empírica basada en mediciones. Resumiendo, la difracción debida a la presencia de múltiples techos de edificios separados a lo largo del

trayecto de radiopropagación, en el término  $L_{msd}$  en (2), es modelada por pantallas absorbentes de la misma altura de los edificios y las pérdidas a las que conlleva están dadas por:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) - 9 \log(b) \quad (7)$$

donde  $d$  se da en kilómetros,  $f$  en MHz,  $b$  en metros y cada uno de los parámetros adicionales de (7) se especifican a continuación.

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_{Base}) & \text{para } h_{Base} > h_{Roof} \\ 0 & \text{para } h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases} \quad (8)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_{Base} > h_{Roof} \\ k_a = 54 - 0.8 \Delta h_{Base} & \text{para } d \geq 0.5 \text{ km} \\ y h_{Base} \leq h_{Roof} \\ 54 - 0.8 \Delta h_{Base} \frac{d}{0.5} & \text{para } d < 0.5 \text{ km} \\ y h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases} \quad (9)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_{Base} \geq h_{Roof} \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_{Base}}{h_{Roof}} & \text{para } h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases} \quad (10)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para ciudades medianas y centros suburbanos con mediana densidad de árboles} \\ 1.5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para centros metropolitanos} \end{cases} \quad (11)$$

donde

$$\Delta h_{Base} = h_{Base} - h_{Roof} \quad (12)$$

El término  $k_a$  representa el incremento de Path Loss debido a una antena de la radio base ubicada a una altura menor a la de los techos de los edificios adyacentes. Los términos  $k_d$  y  $k_f$  controlan la dependencia de las pérdidas por difracción debidas a múltiples filos de cuchillos versus la distancia y la frecuencia de radio, respectivamente. Por otro lado, si las características de los edificios y las calles son desconocidas, los siguientes valores por defecto, para los parámetros, pueden ser utilizados para la realización de un trabajo aproximado:

$$h_{Roof} = \begin{cases} 3m * n_{floors} \\ \rightarrow \text{para techos planos} \\ 3m * n_{floors} + 3m \\ \rightarrow \text{para techos puntiagudos} \end{cases} \quad (13)$$

$$b = 20... 50m, w = b/2, \varphi = 90^\circ$$

donde  $n_{floors}$  es el número de pisos de los edificios. El modelo está restringido para  $800MHz \leq f \leq 2000MHz$ ,  $4m \leq h_{Base} \leq 50m$ ,  $1m \leq h_{Mobile} \leq 3m$  y  $0.02km \leq d \leq 5km$ , comportándose de forma muy adecuada para situaciones donde la altura de la antena de la BS es mayor a la de los edificios. Sin embargo, se pueden presentar grandes errores para condiciones donde  $h_{Base} \approx h_{Roof}$  y un desempeño pobre cuando  $h_{Base} \ll h_{Roof}$ . Por otro lado, debido a que los parámetros  $b$ ,  $w$  y  $\varphi$  no son considerados físicamente significativos en micro-celdas el error en la predicción de Path Loss en estos casos puede ser demasiado grande.

El modelo no considera propagación multi-trayectoria y su confiabilidad en la estimación del Path Loss disminuye si el terreno no es plano o si la región de cobertura no es homogénea. Debido a que el modelo se diseñó para un correcto desempeño en terreno plano, fue necesaria la realización de aproximaciones para la óptima estimación de pérdidas de propagación por medio del algoritmo diseñado, en el caso de entornos semi-urbanos sobre terreno montañoso. Estas aproximaciones se explican a fondo más adelante.

Una alternativa de aproximación, para el cálculo de las pérdidas debidas a múltiples edificios difractores, es reemplazar  $L_{msd}$  por  $L_n(t)$  del modelo de filos de cuchillo uniformes propuesto por S.R. Saunders en [2, 8.4.4]. Esto habilitaría al exponente de Path Loss para que varíe de acuerdo con el número de edificios y ser además uniformemente válido para los casos en que  $h_{Base} \leq h_{Roof}$ . Sin embargo, nótese que en radio bases con antenas muy bajas, otros mecanismos de propagación estarían presentes, así como la difracción alrededor de los bordes verticales de los edificios y las múltiples reflexiones provenientes de las paredes de los mismos, siendo significativas a la hora de predecir las pérdidas totales.

El modelo aplicado en el desarrollo del algoritmo para entornos semi-urbanos tipo escarpado utilizó todas las ecuaciones antes mencionadas para la estimación de Path Loss, considerando además la modificación propuesta en [4] para las pérdidas debidas a la difracción final, proveniente del techo del último edificio, y la reflexión de la pared del edificio si-

guiente, resumida en  $L_{rts}$ . De esta forma la constante de la ecuación (4) pasaría de ser -16.9 a ser -8.2, obteniéndose

$$L_{rts} = -8.2 - 10\log(w) + 10\text{Log}(f) + 20\text{Log}(\Delta h_{Mobile}) + L_{Ori} \quad (14)$$

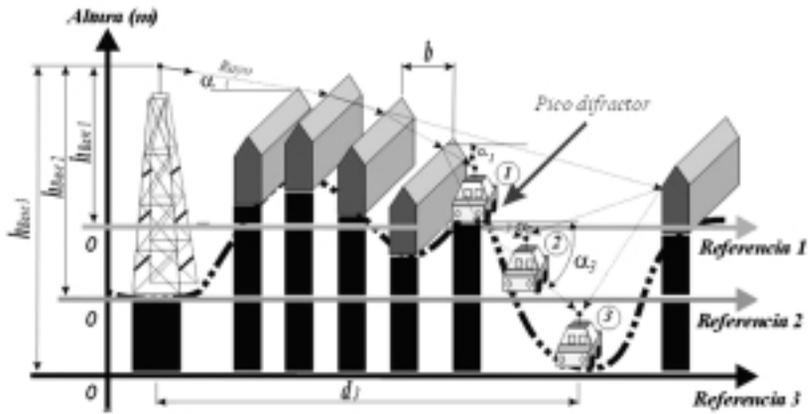
donde  $w$  se expresa en metros,  $f$  en MHz y  $\Delta h_{Mobile}$  en metros. Una descripción detallada de las tesis consideradas para esta modificación se encuentra en [4].

#### ALGORITMO PARA ENTORNOS SEMI-URBANOS AFECTADOS POR COLINAS

Con el objetivo de hacer todas las consideraciones para un entorno semi-urbano sobre terreno escarpado (ver Figura 3) se realizaron algunas aproximaciones para así poder calcular el Path Loss por medio del algoritmo diseñado para el modelo *COST231-Walfisch-Ikegami*.

Básicamente la aproximación utilizada sigue los principios de la difracción debida a múltiples filos de cuchillo, considerando además ciertas características físicas del entorno para el cálculo de las pérdidas en (7) y (14). Para la obtención de todos los parámetros del modelo se consideró en primera instancia la ubicación de MS respecto al entorno; a manera de ejemplo, las tres ubicaciones relativas presentadas en la Figura 3. De esta forma, las alturas efectivas de todos los obstáculos presentados a lo largo del trayecto del rayo de radio-propagación, incluida la BS, tendrán una referencia cero diferente, dependiendo de la ubicación del MS sobre el terreno. Esto ocasiona que las al-

turas de los edificios difractores ( $h_{Roof}$ ) y la de BS ( $h_{Base}$ ) varíen dependiendo del perfil analizado y la referencia dada por la ubicación del receptor. Además, según sea la ubicación del MS, también se generarán picos difractores en relación con las colinas existentes a lo largo del trayecto, lo que ocasionará que estas afecten la altura promedio de los filos de cuchillo ( $h_{Roof}$  para los cálculos finales de  $L_{msd}$ ), la difracción múltiple, y que en ocasiones no sean los techos de los edificios los que generen la difracción final para el cálculo de  $L_{rts}$ , sino los picos del terreno ubicados al final del trayecto antes del MS. Esto se muestra para las posiciones 2 y 3 en la Figura 3, donde el pico debajo de la posición 1 se convierte en un filo de cuchillo al final del trayecto hacia los receptores 2 y 3. De igual manera las distintas colinas, de tamaño considerable, ocasionarán que el valor promedio de  $b$  varíe según sea la separación entre los edificios y ellas mismas, como se aprecia en la Figura 3. Por otro lado, el valor de  $w$  dependerá del último obstáculo difractor ubicado antes del MS, ya sea un edificio o una colina. Según las consideraciones para este algoritmo, todos los obstáculos son tratados como elementos de la misma clase, ya que sólo se estima el efecto difractor de los mismos, a excepción de los casos donde se presenta LOS, en los cuales se calcula el rayo reflejado en tierra, lo que en general ha dado resultados aceptables como se aprecia en el análisis presentado más adelante. Dado que el modelo *COST231-Walfisch-Ikegami* está habilitado para los casos en que la altura de la antena de la BS está a menor altura que la de los techos de los



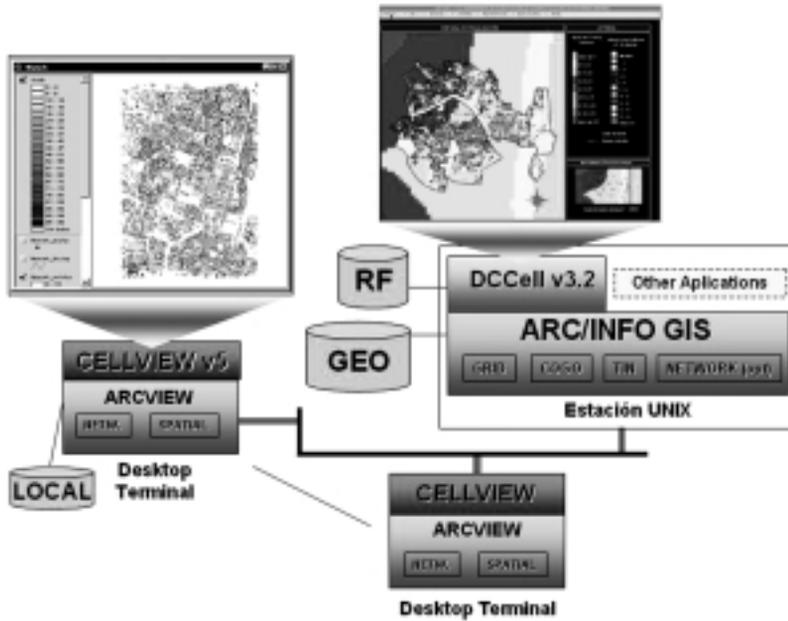
**Figura 3.** Geometría del algoritmo implementado para la aproximación en terreno montañoso.

edificios, éste también se comportará de manera aceptable cuando los edificios están ubicados sobre colinas que sobrepasan la altura  $h_{Base}$ .

Se presentan algunos casos especiales, también considerados dentro del algoritmo, cuando no existe la presencia de edificios, estimando que el modelo es afectado únicamente por la difracción debida a múltiples filos de cuchillo generados por los picos del terreno. Además, gracias al uso de un Sistema de Información Geográfica, para cada ubicación particular del MS se analiza de forma independiente si la variabilidad del terreno es suficiente, respecto al MS, para ser tenida en cuenta dentro de los cálculos, y se estima de igual forma la orientación de la vía sobre la que se encuentra ubicado el receptor. En pocas palabras, el algoritmo fue diseñado para desempeñarse en tres casos diferentes e independientes: entornos urbanos sobre terreno plano, entornos urbanos sobre terreno montañoso y entornos montañosos; habilitando para cada uno de los casos la

presencia o no de vías con sus respectivos parámetros de orientación. En particular, en el presente artículo se hace referencia a entornos semi-urbanos debido a que el algoritmo está capacitado para la consideración de poca densidad de edificios sobre terreno montañoso o plano, y además, a que en el estudio realizado se incluyeron procesos de simulación y validación de resultados (por medio de mediciones) en un sector de la ciudad de Bucaramanga que cumple con estas características.

Hacia futuro, para mejorar el desempeño del algoritmo podrían considerarse otra serie de aproximaciones donde se tengan en cuenta con mayor veracidad la variabilidad del terreno y las curvaturas significativas de los picos, ya que al asumirlas de un ancho infinitesimal se está contribuyendo al incremento del error en el cálculo del Path Loss. Una alternativa es considerar a las colinas como un cilindro de radio finito, tal como lo propone el modelo de difracción por cascada cilindros [9]. Otro



**Figura 4.** Diagrama de bloques herramientas CellView y DCCell. Cortesía UVP

acercamiento, donde el cilindro difractor es aproximado a un filo de cuchillo, permitiendo reducir la complejidad del proceso, se postula en [2, 6.7]

#### HERRAMIENTA DE PLANIFICACIÓN COMPUTARIZADA BASADA EN GIS - EL CELLVIEW

Muchos de los modelos avanzados de propagación a menudo se implementan dentro de programas de cómputo para hacer más práctica la planificación. El desarrollo de esta clase de software basado en GIS ha sido motivado y promovido por un gran número de factores, entre los cuales están:

- La enorme y creciente necesidad de planificar sistemas celulares con precisión y velocidad.

- El desarrollo de rápidos recursos de cómputo.
- El desarrollo de sofisticados Sistemas de Información Geográfica, los cuales pueden contener datos cartográficos e información organizacional de emplazamientos urbanos, áreas de lotes, alturas de edificios, orientación de calles, alturas del terreno, etc., y que hacen fácil su manipulación gracias al manejo de archivos de información tipos *Vector* y *Raster*.

Varias técnicas computacionales han sido implementadas en herramientas de planificación comerciales. Algunas de estas herramientas se listan en [2, C.2]

Para responder a los exigentes retos de modelamiento, el GCM-UPV de-

sarrolló la herramienta de planificación *DCCell* en un entorno UNIX sobre *ARC/INFO*. Más adelante se diseñó el *CellView* [13] sobre *ArcView*, herramienta que ha sido utilizada por el grupo GTI-UIS para el desarrollo del presente estudio, gracias a un convenio de cooperación entre las Universidades UVP, Icesi y la UIS, y sobre la cual se empalmó el algoritmo diseñado para la predicción del Path Loss para entornos semi-urbanos sobre terreno montañoso, basándose en [10] y [4]. Las dos herramientas mencionadas aprovechan las ventajas del GIS en cuanto al manejo de archivos de información geográfica tipo *Raster*; lo cual brindó grandes posibilidades de manipulación de datos al algoritmo diseñado para las distintas consideraciones realizadas en el estudio de radio comunicación para la ciudad de Bucaramanga. Las extensiones del *ArcView* para el geoprocésamiento cartográfico, ofrecieron ayudas adicionales para el análisis y edición de datos. Entre otras, se resaltan las extensiones: *Spatial Analyst*, *Geoprocessing* y *3D Analyst*. En la Figura 4 puede apreciarse el proceso llevado a cabo para el desarrollo del *CellView*, partiendo de la experiencia del *DCCell*, pasando por una primera versión de *CellView* para *Windows*, hasta llegar a la herramienta actual sobre una plataforma *ArcView* (*CellView v5*), con posibilidades locales de planificación celular desarrolladas sobre el mismo GIS y librerías externas fácilmente enlazables.

Para el desarrollo de la presente investigación aplicada fue necesaria la edición y/o creación de tres archivos tipo *Raster* requeridos por el algoritmo implementado y los cuales permitieron incluir un nivel de realidad

mayor a la simulación. De esta forma, se generó dentro de la herramienta un nuevo tipo de análisis según el entorno, el cual fue llamado "*Entorno Total*", donde se incluyen archivos independientes con información de alturas de edificios, alturas del terreno y orientación de vías. En la Figura 5 se presenta el esquema utilizado para la ejecución del algoritmo, incluyendo los archivos de entrada, funciones de manipulación y archivos de salida. En la Figura 6 se presenta la interfaz de usuario para la ejecución de los análisis tipo *Total*.

Se debe destacar que la utilización del *CellView* [13], como plataforma para el montaje del algoritmo diseñado en la UIS, permitió hacer cálculos de cobertura (tipo macro-celda) con los modelos de propagación habilitados dentro de la herramienta (incluyendo al nuevo modelo), cálculos de cobertura con el modelo Walfisch-Bertoni [8] adaptado a medidas [13], cálculos de zonas de Fresnel entre determinados puntos (entre la BS y puntos donde se realizaron las campañas de medidas), identificación de zonas que presentan línea de vista (LOS) e importación de archivos (en formato TEMS) de las campañas de medidas realizadas en cada una de las seis rutas seguidas en dos barrios de la ciudad de Bucaramanga. Para la habilitación de las anteriores funciones fue necesaria la creación y modificación de pequeños *scripts* (en lenguaje propietario *Avenue* del *GIS ArcView*) pertenecientes a la aplicación *CellView*, de complejidad relativamente baja, lo que permitió crear una nueva proyección de georreferenciación para los mapas de la ciudad de Bucaramanga y los mapas de las mediciones realizadas, además de

habilitar todas las funciones de cálculo antes mencionadas.

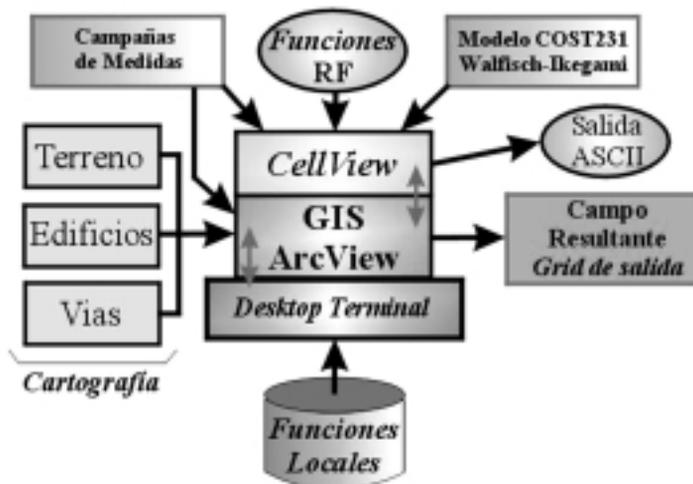
Otras posibilidades de análisis que surgen como ventaja de la utilización de una Herramienta de Planificación basada en GIS, como el *CellView*, se pueden apreciar en [6].

### PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

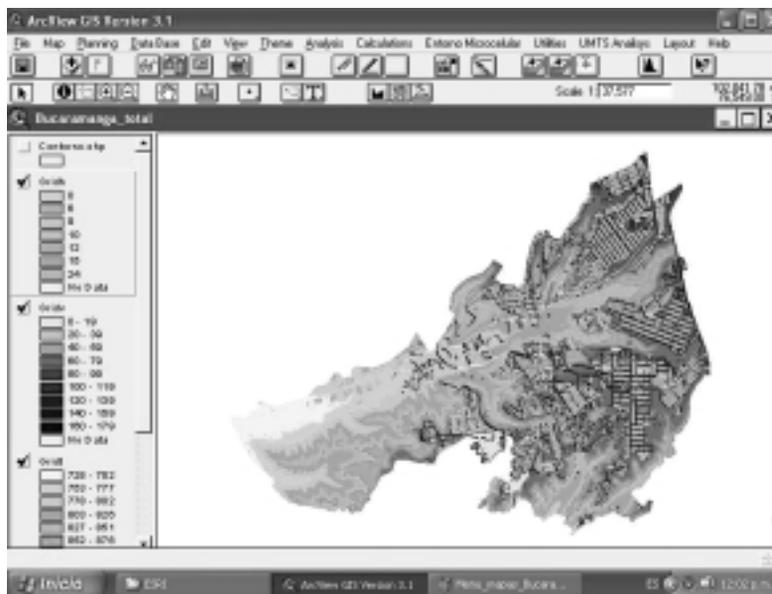
Para la realización de las simulaciones se siguieron ciertos parámetros de entrada y consideraciones que permitieron al final del proceso obtener resultados fácilmente evaluables. En primer lugar, debido a los requerimientos del modelo de propagación *COST231-Walfisch-Ikegami*, se necesitaron tres archivos de entrada tal como se mencionó en la sección anterior, ellos fueron: alturas de edificios (dadas en metros), alturas del terreno (dadas en metros) y orientación de las vías respecto al oriente geográfico (dada en grados). Tal como se explicó previamente, todas las alturas de los obstáculos (edificios y picos del terreno) y la altura de la antena de la BS se referenciaron a la altura del terreno justo debajo de la ubicación del MS. En la Figura 7 se aprecian las gráficas de los archivos de entrada, para los edificios y el terreno, utilizados en la zona piloto escogida para la realización del presente estudio. La *Zona Piloto* para *Bucaramanga* se identificó anticipadamente siguiendo los parámetros de análisis establecidos en la aproximación utilizada en [3] para las consideraciones del efecto del terreno sobre el Path Loss en ambientes de tipo urbano, siguiendo un modelo de colina-valle-colina en la mayoría de las direcciones. Con el objetivo de obtener resultados útiles para la ejecución de comparaciones con otros modelos, se realizaron si-

mulaciones de forma independiente, considerando en primera instancia sólo el archivo de alturas de edificios y utilizando todos los modelos para entorno urbano habilitados dentro del *CellView* (para más detalles sobre los modelos ver [13, A1.4]). Como segundo paso, se realizaron simulaciones con el archivo de alturas del terreno utilizando uno de los modelos para entorno rural habilitado dentro de la herramienta. En el paso final, se recurrió al *algoritmo* diseñado para el modelo de estudio, haciendo uso de los tres archivos de entrada de forma simultánea, opción que no se encontraba habilitada dentro del *CellView*.

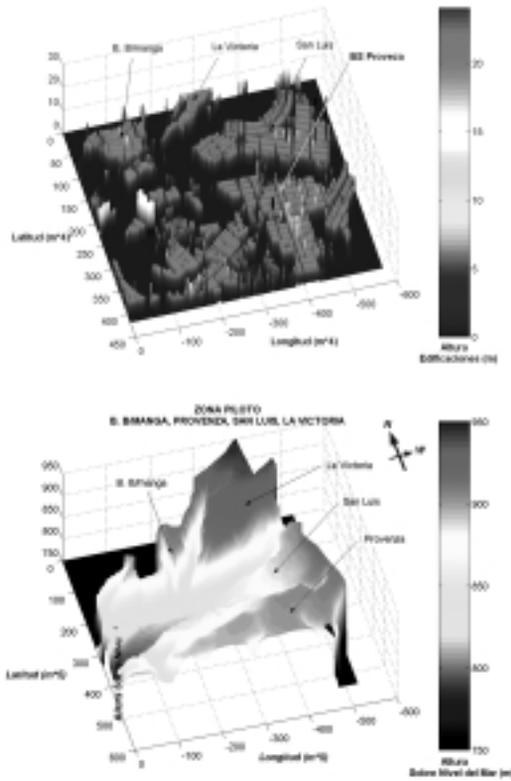
Siguiendo el objetivo de realizar las simulaciones de la forma más real posible, se recurrió al estudio de los parámetros principales que definen a la BS que cubre el servicio de telefonía móvil celular (estándar IS-136) en la zona piloto de estudio. Las características principales de la estación base se definen en [14], destacándose que el sistema actualmente instalado en la ciudad de Bucaramanga corresponde a una versión TDMA que se desempeña en la banda de los 800-900MHz. Como uno de los principales parámetros de entrada para el algoritmo diseñado, se encuentra el patrón de radiación de las antenas utilizadas en dicha BS, el cual correspondió a un tipo de antena Omni fabricada por la compañía *Decibel Products* [15]. En este caso la antena fue la referenciada como *ASPD 977*, cuyo patrón de radiación se aprecia en la Figura 8 y el cual fue obtenido gracias a los planos H-V del patrón encontrado en [15]. Todos los valores de ganancia de la antena, para cada uno de los puntos en la zona de cobertura, es-



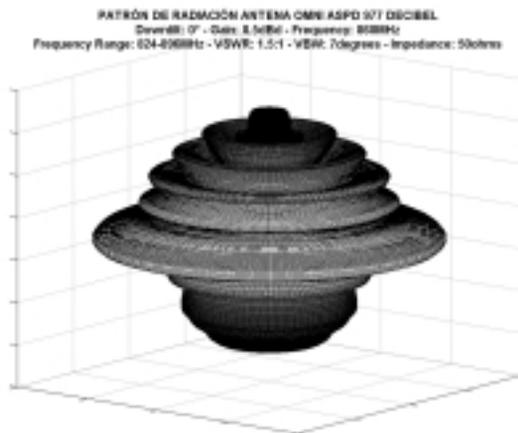
**Figura 5.** Diagrama de bloques del proceso de ejecución del algoritmo. Archivos de entrada, funciones y archivos de salida.



**Figura 6.** Interfaz de usuario para análisis tipo **Entorno Total**. Archivos tipo Raster utilizados en el estudio para la ciudad de Bucaramanga.



**Figura 7.** Parámetros físicos de entrada. En la parte superior se aprecian los edificios de la zona piloto de análisis y en la parte inferior la constitución geográfica del terreno. Las vías son definidas según los contornos de los edificios y lotes del sector.



**Figura 8.** Patrón de radiación antena Omni ASPD 977.

tán dados en decibeles y corresponden a la mitad volumétrica inferior del patrón de radiación de la Figura 8, teniéndose 8.5dBd como ganancia de referencia para esta antena. Todos los demás parámetros de la BS y los utilizados como valores de entrada para la realización de las simulaciones se aprecian en la Tabla 1.

Los parámetros utilizados para el MS se restringieron a las características del equipo de medición *Miniport Receiver EB200* [16], facilitado por el Ministerio de Comunicaciones de Colombia Seccional Bucaramanga, y para el cual se tomó como valor de ganancia de recepción 0dB, debido a la compensación de ganancias y pérdidas ocasionadas por la antena, co-

nectores, amplificadores, etc., del mismo equipo.

Para la realización de las campañas de medidas, utilizadas para la validación de resultados del algoritmo, fue necesario el uso del Canal de Control Analógico (CCA) ubicado en los 880.11MHz para la BS de estudio. Dado que los resultados de las mediciones se dieron en dB  $\mu\text{V}/\text{m}$  se requirió la conversión de este valor a unidades manejables por el algoritmo (i.e. dBm) y para ello se utilizó la ecuación (15) obtenida de [5]. La cual es válida para una resistencia real de carga en el receptor  $R_L = 50\Omega$

$$P_r(\text{dBm}) = E(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}) - 113\text{dB} + 10\text{Log}\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \quad (15)$$

**Tabla 1.** Parámetros de la BS y el MS. Valores de entrada para las simulaciones.

Parámetros	Valor
Pire del transmisor	42.48dBm
Ganancia del receptor	0dB
Ganancia antena ASPD 977	8.5dBd
Frecuencia CCA	800.11 MHz
Altura del transmisor	40m
Altura del receptor	1.7m
Downtilt de la antena	0°
Acimut de la antena	90°
Factor de curvatura K	1.33
Tamaño de celdas del grid para simulación	2m

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

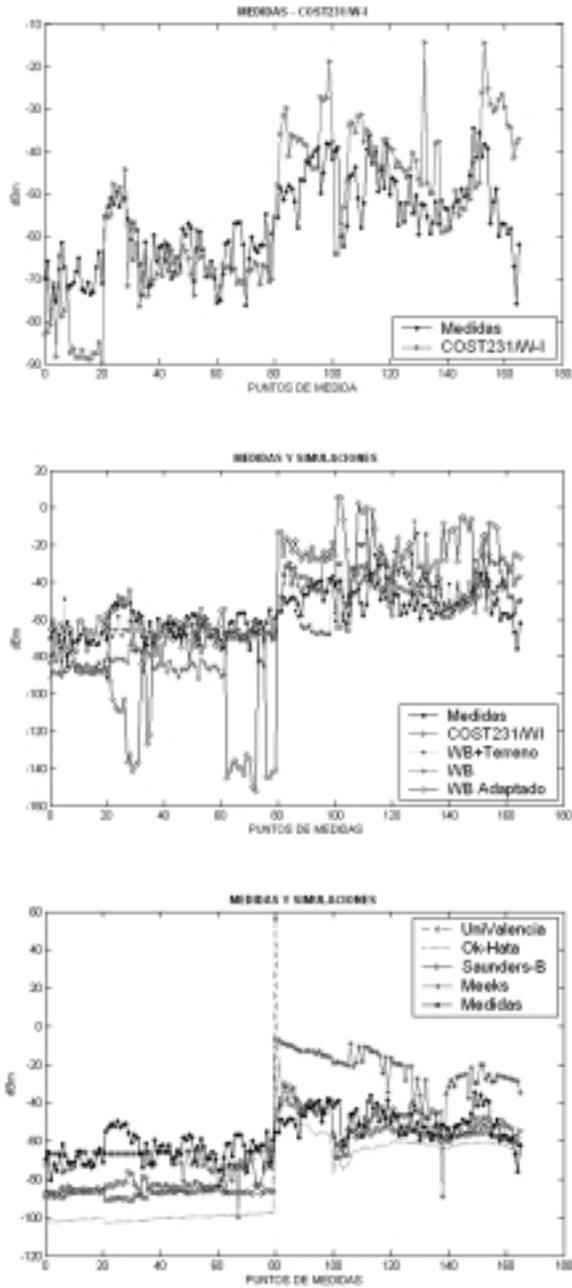
Los resultados de simulación del algoritmo diseñado para el modelo *COST231-Walfisch-Ikegami* se muestran en las Figuras 9 y 10, comparándose en la Figura 9 (gráfica superior) con los resultados de las mediciones realizadas en las seis rutas escogidas para las campañas de medidas. Para las *rutas 2, 3 y 5* el modelo se comportó de forma muy aproximada y no tanto para las *rutas 1, 4 y 6*. Dado que las mediciones se llevaron a cabo siguiendo la consideración colina-valle-colina, de forma similar a las posiciones *1, 2 y 3* de la Figura 3, agregando además una posición *4* en la colina al final de la gráfica, se puede afirmar que el modelo se comportó de forma aceptable independientemente de la variabilidad del terreno. Sólo en condiciones donde los cambios en la altura del terreno son muy pequeños comparados con el promedio de altura de los edificios, como es el caso de las *rutas 1, 4 y 6*, el algoritmo presenta mayores errores, problema fácil de solucionar para posteriores simulaciones. Por otro lado, en casos específicos donde no se define exactamente la orientación de las vías, como son los puntos de convergencia de varias calles, se presentan los mayores errores. Una comparación entre las distintas simulaciones, utilizando algunos modelos habilitados dentro del CellView, el algoritmo diseñado y las mediciones realizadas, se muestra en la Figura 9, gráfica inferior. De esta se puede apreciar que el comportamiento del algoritmo se encuentra dentro de los márgenes aceptables y que sigue de forma más aproximada el comportamiento de las mediciones en comparación con los otros modelos.

Se debe tener en cuenta que algunos factores no fueron considerados en la simulación, como lo son la utilización de paneles reflectores en las antenas y la distribución de la sectorización de la BS, lo cual pudo ocasionar grandes errores en zonas de solapamiento de sectores y en donde el patrón de radiación de la antena utilizada no tiene gran ganancia.

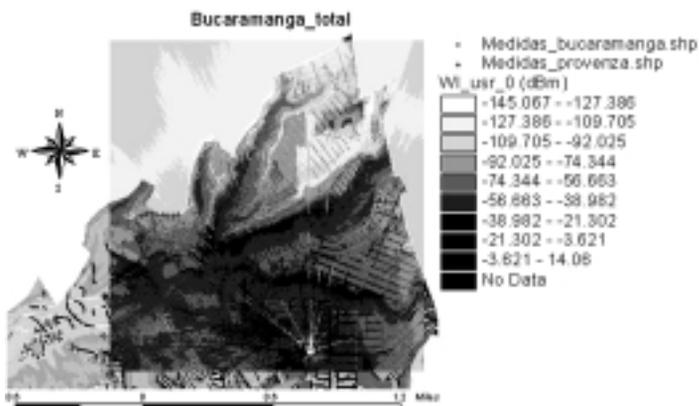
Realizando un análisis por medio del cálculo de las zonas de Fresnel, para un perfil que cumpliera con la condición colina-valle-colina, se obtuvo un resultado aceptable el cual se aprecia en la Figura 11. Se puede valorar que a partir de los puntos donde la primera y segunda zonas de Fresnel son obstruidas, el nivel de la intensidad de campo recibido decae abruptamente, cumpliendo con los conceptos físicos establecidos.

## CONCLUSIONES

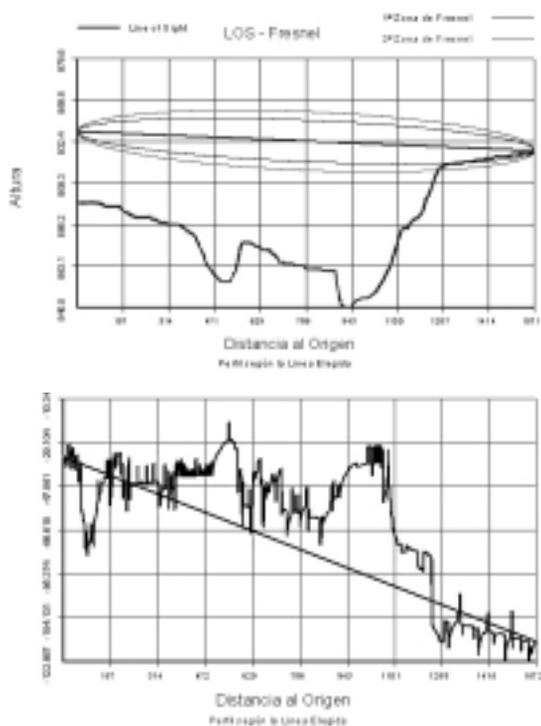
Este trabajo ha demostrado resultados aceptables en cuanto al desempeño del algoritmo diseñado para la predicción de Path Loss en entornos semi-urbanos sobre terreno montañoso, basándose en el modelo *COST231-Walfisch-Ikegami* [10], las modificaciones presentadas en [4] al mismo modelo y las mediciones realizadas en la ciudad de Bucaramanga. El error medio de los resultados de simulación comparados con las campañas de medidas se ubicó en el rango de los  $\pm 6$ dB y la desviación estándar en el rango de los 3-9dB. No se obtuvieron buenos resultados en los sectores donde la variabilidad del terreno era pequeña comparada con las alturas de los edificios y en los puntos donde había convergencia de varias calles. El modelo *Walfisch-Bertoni ajustado a mediciones*, incluido en el CellView, pre-



**Figura 9.** Comparación de resultados de simulación versus campañas de medidas. En la parte superior se aprecian los resultados del algoritmo diseñado relacionados con las mediciones. En el centro y figura inferior los resultados de todos los modelos relacionados con las mediciones.



**Figura 10.** Vista del resultado de la simulación (recuadro). En las regiones oscuras se presenta mayor intensidad del campo recibido y en las más claras una menor intensidad, según los valores de la escala lateral.



**Figura 11.** Análisis según las Zonas de Fresnel para el barrio La Victoria. En la parte superior se aprecian la primera y segunda zonas de Fresnel para el perfil de estudio. En la parte inferior se aprecia la intensidad del campo recibido a lo largo del perfil (datos en dBm).

sentó el mayor margen de error para todos los sectores. Los modelos *Uni-Valencia* y *Saunders-Bonar*, en los sectores de terreno plano, fueron los más aproximados, y el modelo *Meeks Exacto* junto con el *Algoritmo COST231/WI* presentaron un mejor comportamiento en los sectores afectados por las colinas y el cañón a lo largo del perfil. De esto puede concluirse que el desempeño del algoritmo en la mayoría de los casos se encuentra dentro de los márgenes tolerables y que el uso de una herramienta de planificación basada en GIS ofrece grandes ventajas a la hora de obtener veracidad, simplicidad y ahorro de tiempo en el desarrollo de estudios de esta clase. Como desventaja de la herramienta CellView está su dependencia del lenguaje propietario *Avenue* del GIS ArcView, lo cual restringe la manipulación de la información para el desarrollo de ciertas aplicaciones.

La aproximación por difracción de múltiples filos de cuchillo, tanto para los edificios como para las colinas, se comportó de forma apropiada, destacándose que podría obtenerse un mejoramiento sustancial, mediante la aplicación de aproximaciones para el terreno, utilizando la teoría de difracción por cascada de cilindros planteada en [2, 6, 7], [3] y [9]. Además, el contar con información cartográfica ac-

tualizada, haciendo uso de imágenes satelitales, y el conocer de forma precisa el tipo de patrón de radiación de la antena transmisora, los parámetros de ganancia-pérdidas de la BS y la distribución de la sectorización permitirían realizar simulaciones más precisas y confiables. Con el mismo objetivo de mejorar los resultados en el cálculo de Path Loss se podrían aprovechar las ventajas de una plataforma GIS e incluir otros mecanismos de propagación y efectos ambientales en las simulaciones, tales como: difracción por bordes verticales de edificios, atenuación por árboles, refracción troposférica, temperatura ambiental y condiciones de sol o lluvia, entre otros.

En particular, dado el gran interés en el desarrollo de una herramienta de planificación celular para la región andina, basada en un software de uso libre y pensando en la llegada de los sistemas *2.5G*, *3G* y *4G*, se concluyó la presentación de la propuesta de Investigación Aplicada «*Diseño de una plataforma basada en GIS para el estudio de modelos de radio propagación en la zona andina*» presentada ante el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología de Colombia, y donde participan los Grupos de Investigación GTI (de la E3T-UIS), Geomática (de Ingeniería Civil-UIS), I2T (de la Universidad Icesi) y GCM (de la UPV de España). ☀

## REFERENCIAS

- [1]. Henry L. Bertoni. Radio Propagation for Modern Wireless Systems, USA: Prentice Hall PTR, 2000.
- [2]. Simon R. Saunders. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Baffins Lane, Chichester, West Sussex U.K: John Wiley & Sons, Ltd., 1999.
- [3]. Leonard Piazzzi and Henry L. Bertoni, "Effect of Terrain on Path Loss in Urban Environments for Wireless Aplicatios", IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 46, No. 8, August 1998.
- [4]. Dongsoo Har, Alix M. Watson and Anthony G. Chadney. "Comment on Diffraction Loss of Rooftop-to-Street in COST 231-Walfisch-Ikegami Model", IEEE Trans. Vehicular Technology, Vol. 48, No. 5, September 1999.
- [5]. William C. Y. Lee. Mobile Cellular Telecommunicatios Systems, USA: McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [6]. Narcís Cardona Marcet y Andrés Navarro Cadavid. "Modelo de simulación para análisis de capacidad en sistemas W-CDMA usando herramientas de planificación basadas en GIS y Matlab" IEE First International Communications Techonologies, Londres, U.K, Marzo 2000.
- [7]. Harri Holma and Antti Toskala, WCDMA for UMTS, Radio Access For Third Generation Mobile Communications, West Sussex U.K: John Wiley & Sons, Ltd., 2000.
- [8]. Joram Walfisch and Henry L. Bertoni. "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments," IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 36, No. 12, December 1988.
- [9]. D.E Eliades. "Terrain Simulation for the Cascaded Cylinder diffraction Model," IEE Proceedings-H, Vol. 140, No. 4, August 1993.
- [10]. Cost 231 Final report. Digital Mobil Radio: COST 231 View on the Evolution Towards 3rd Generation Systems, P. 134-140, Commission of the European Communities and COST Telecommunications, Brussels, 1999.
- [11]. F. Ikegami, T. Takeuchi, and S. Yoshida, "Theoretical Prediction of Mean Field Strength for Urban Mobile Radio," IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 39, No. 3, 1991.
- [12]. S.R.Saunders and F.R. Bonar. "Prediction of Mobile Radio Wave Propagation Over Buildings of Irregular Heights and Spacings". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 42, No. 2, February 1994, pp. 137-144.
- [13]. Vicente Roig Galán. "Planificación y análisis de sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación sobre CellView", Universidad Politécnica de Valencia, Valencia España, 1996.
- [14]. Noé Darío Valero y Ricardo Carreño, «Sistemas móviles terrestres: diseño de cobertura celular para la Comuna 12 que conforma la Zona Metropolitana de Bucaramanga», Universidad Pontificia Bolivariana, Especialización en Telecomunicaciones, Agosto de 2001.
- [15]. "Vari-Tilt Omni Antenna - ASDP-975, ASPD-977, ASP-978, 8.5 to 10dBd Gain", web page Decibel Products: [www.decibelproducts.com](http://www.decibelproducts.com)
- [16]. "Miniport Receiver EB200 - Portable Monitoring From 10kHz to 3GHz", web page Rohde&Schwarz: [www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com)

## CURRÍCULOS

**ALEXIS PAOLO GARCÍA ARIZA.** Nació en Bucaramanga-Colombia el 9 de junio de 1978. Obtendrá el título de Ingeniero Electrónico en diciembre de este año en la Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Hace parte del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones e Informática-GTI-UIS, Bucaramanga-Colombia. Actualmente, como tesis de carrera y base de este artículo, realiza investigaciones en el ámbito de Modelos de Propagación aplicables a la región andina utilizando GIS, en cooperación con el Ministerio de Comunicaciones de Colombia-Seccional Bucaramanga, Icesi y la UPV. Sus áreas de interés incluyen sistemas de tercera generación, sistemas de información geográfica aplicados a las telecomunicaciones, modelos de propagación y redes de datos móviles. (Teléfono: (57 7) 634 4000 -Ext. 2356, 637 5356  
e-mail: paolo\_1@ieee.org, alexis\_paolo@yahoo.es).

**HOMERO ORTEGA BOADA.** Ph.D. of Engineering Sciences de la Universidad Internacional de la Aviación Civil de Kiev-Rusia. Actualmente trabaja como profesor e investigador en la Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones, pertenece al Grupo de Investigación en Telecomunicaciones e Informática-GTI-UIS, Bucaramanga-Colombia. Anteriormente trabajó como instructor e investigador en la empresa Ericsson, con tecnologías como PSTN, IN, ATM, IP, NGN, DWDM,

DataCom. A.A. 678 Bucaramanga, Colombia (Teléfono: +573 259 4033, e-mail: hortegab@uis.edu.co).

**ANDRÉS NAVARRO CADAVID.** Nació en Medellín, Colombia, el 28 de mayo de 1969. Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Obtuvo la Maestría en Gestión Tecnológica en la Universidad Pontificia Bolivariana y ahora es candidato a Doctor Ingeniero de Telecomunicación en la Universidad Politécnica de Valencia, España. Actualmente trabaja como profesor e investigador de la Universidad Icesi, Cali-Colombia. Dirige el Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones-I2T-Icesi. Sus áreas de interés incluyen sistemas de tercera generación, CDMA, sistemas móviles y redes de datos móviles (Teléfono: (57 2) 555 2334 - Ext.410, 555 1745, e-mail: anavarro@icesi.edu.co).

**ALEXYS HERLEYM RODRÍGUEZ AVELLANEDA.** Nació en Bucaramanga-Colombia el 22 de septiembre de 1975. Ingeniero Civil de la Universidad Industrial de Santander, Especialista en Telecomunicaciones de la Universidad Autónoma de Bucaramanga. Actualmente trabaja con Sistemas de Información Geográfica, Herramientas CAD, GPS, procesos de Teledetección y Bases de Datos. Sus áreas de interés incluyen sistemas de información geográfica aplicados a las telecomunicaciones, redes de datos, sistemas de posicionamiento y las áreas referentes a la Geomática. (Teléfono: (57 7) 634 4000-Ext. 2356, 637 2701  
e-mail:alexys\_6@yahoo.es).

