

Modelos de canal inalámbricos y su aplicación al diseño de redes WiMAX.

Ingeniero Alexander Galvis Quintero

Cristina Gómez Santamaría, MSc.

Roberto Carlos Hincapié Reyes, MSc.

*Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática (GIDATI).
Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín.*

Fecha de recepción: 30-05-06

Fecha de selección: 30-10-06

Fecha de aceptación: 30-08-06

ABSTRACT

This article details of general way the advance of a masters thesis developed within the framework of the Group of Investigation, Development and Application in Telecommunications and Informatics (GIDATI) of the Pontifical Bolivariana University. First stage of the project consists on the classification of wireless channel models and the identification of which they apply to the work conditions of the systems defined by the IEEE 802.16-2004 standard. The second phase corresponds to the comparative analysis of these models and to their implementation in the ICS Telecom software of the French company ATDI in order to optimize some processes related to the design of these networks. The results have allowed to date deducing some important

conclusions and to contribute to support other research and development activities in execution currently.

KEY WORDS

Channel model, WiMAX, radio propagation, 802.16, FWA.

RESUMEN

El presente artículo detalla de manera general el avance actual de un proyecto de maestría desarrollado en el marco de trabajo del Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática (GIDATI) de la Universidad Pontificia Bolivariana. La primera fase del proyecto consiste en la clasificación de los modelos de canal inalámbricos y la identificación de aquellos que aplican a las condiciones de trabajo de los sistemas definidos por

el estándar IEEE 802.16-2004. La segunda fase corresponde al análisis comparativo de estos modelos y a su implementación en el software ICS Telecom de la empresa francesa ATDI con el objetivo de optimizar algunos procesos relacionados con el diseño de estas redes. Los resultados han permitido hasta la fecha sacar

algunas conclusiones importantes y aportar realimentación a otras actividades de investigación y desarrollo en ejecución.

PALABRAS CLAVE

Modelo de canal, WiMAX, radio propagación, 802.16, FWA.

Clasificación Colciencias: A

I. INTRODUCCIÓN

Las actividades de planeación, diseño, despliegue y mantenimiento de redes inalámbricas implican el uso de una serie de herramientas computacionales que han sido creadas con el objetivo de predecir el comportamiento de estas redes para tomar decisiones basadas en los resultados obtenidos de dicha aplicación. Uno de los aspectos más complejos relacionados con los sistemas inalámbricos es la manera como se modela el medio de propagación de las señales, el canal de radio y el ambiente en el cual se encuentra inmerso un sistema particular. Actualmente existe gran variedad de modelos que han sido desarrollados para dar soluciones particulares a los problemas que surgen en cada caso y ambiente de aplicación específico; y aunque en general las soluciones planteadas han ofrecido hasta el momento buenos resultados, existe una notable dificultad relacionada con la elección del modelo óptimo para la situación en estudio, lo que le resta considerable flexibilidad a los procesos mencionados anteriormente. Debido a la importancia misma de las tecnologías involucradas, es necesario desarrollar herramientas que mejoren significativamente los procesos de análisis, diseño e implementación de redes inalámbricas de telecomunicaciones, a la vez que permitan optimizar los procesos de aprendizaje y las actividades de entrenamiento de personal técnico y científico al interior de las empresas, universidades y centros de investigación.

Considerando lo anterior, dentro del Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática (GIDATI) de la Uni-

versidad Pontificia Bolivariana está en actual desarrollo un proyecto de Maestría en Ingeniería, el cual se concentra en la definición del estado del arte en modelamiento de canales de radio, y en la clasificación de los modelos más representativos con el objetivo de apoyar y optimizar las actividades académicas y aquellas técnicas relacionadas con los procesos mencionados inicialmente. Partiendo de esta clasificación general, se ha dirigido la atención a la particularización de los modelos aplicables al estándar IEEE 802.16-2004 [1] y a su implementación en una herramienta de simulación para conformar un modelo general de capas inferiores para estos sistemas. Inicialmente se está realizando una revisión de los modelos de canal existentes que aplican a esta tecnología, extrayendo un subconjunto de ellos de acuerdo con ciertos criterios como el grado de aproximación, la correspondencia con los casos particulares a analizar, el nivel de complejidad previsto para su implementación, entre otros. Los modelos seleccionados son adaptados a los sistemas y ambientes particulares, tarea que implica el esfuerzo más significativo considerando la topografía colombiana. Seguidamente se realizará la simplificación de los mismos para su escritura en lenguaje C++ y generar finalmente las librerías (DLL) que los implementen como modelos de canal definidos/desarrollados por el usuario en el interior del software de planeación, diseño y simulación de redes inalámbricas ICS Telecom® de la empresa francesa ATDI. Las campañas de simulación se encuentran en fase de diseño para obtener resultados que permitan realizar análisis comparativos entre

los diversos modelos estudiados y contrastarlos a la vez con los primeros datos de mediciones reales que se han realizado para el despliegue de infraestructura WiMAX¹ en el país. Finalmente se concluirá y se presentarán propuestas para dar continuidad al trabajo considerando otras alternativas y tendencias.

II .MODELAMIENTO DE CANALES DE RADIO

El modelamiento de canales de radio es uno de los aspectos más críticos a considerar en la construcción de herramientas software que apoyen los procesos de planeación y diseño de redes inalámbricas. Para el caso particular de WiMAX es de especial interés el modelo de canal utilizado para la predicción del comportamiento del sistema, tanto en la estimación de los niveles de cobertura como de las tasas de transmisión alcanzables, más aun teniendo en cuenta que el sistema se ha definido para condiciones de LOS, nLOS y NLOS ² [2]. Como se expone en [3], la práctica más desarrollada y la que mejores resultados ha ofrecido es la de inicialmente describir el canal de forma matemática (modelarlo) para comprender mejor su comportamiento en ciertas condiciones y caracterizarlo de manera detallada. Posteriormente dicho modelo es llevado a un lenguaje computacional para el desarrollo de componentes de simulación que apoyen las actividades

de diseño de redes. El reto siempre es lograr modelos lo suficientemente completos, descriptivos y simples que permitan desarrollar simulaciones eficientes en todos los sentidos.

En términos generales, los modelos de canal buscan predecir el nivel de pérdida de potencia que una señal de ciertas características sufre cuando se propaga por un ambiente geográfico determinado. Como se observa en la Figura 1, el comportamiento de la variable potencia en recepción es

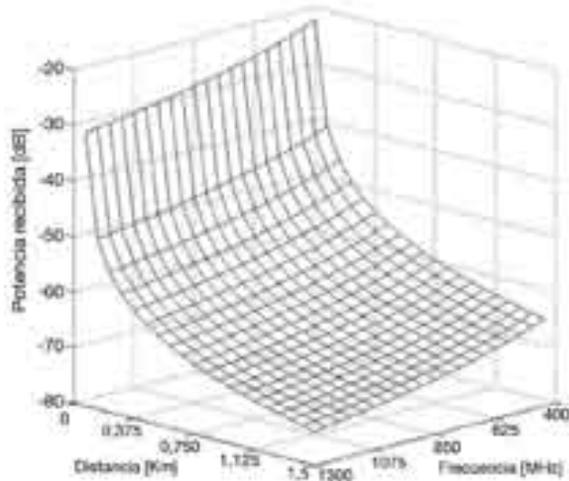


Figura 1. Comportamiento de la potencia recibida en función de la frecuencia de operación y la distancia entre transmisor y receptor.

inversamente proporcional tanto a la distancia de separación entre transmisor y receptor como a la frecuencia de operación, y además, se presentan otros fenómenos (ensombrecimiento, desvanecimiento por multitrayectoria, desvanecimiento por efectos atmosféricos, difracción y refracción, centelleo, *cell breathing*, retardos,

1 WiMAX: Wireless interoperability for Microwave Access (estandarizado por el IEEE 802.16 WG)
2 LOS/nLOS/NLOS: Line Of Sight / near LOS / No LOS.

otras atenuaciones, interferencias y ruido) que cada modelo considera de forma distinta. El tipo de ambiente y los fenómenos mencionados hacen que la superficie mostrada en la Figura 1 cambie significativamente volviéndola no determinística, así que el desarrollo de un modelo matemático del canal de comunicaciones y su posterior implementación software debe considerar tanto los medios de propagación y las frecuencias utilizadas para la radiación de señales como el ambiente geográfico en el cual se va a desplegar el sistema y el tipo de sistema (servicios y aplicaciones).

En [4] y [5] se realiza una clasificación general de radio canales, diferenciando aquellos que han sido formulados empíricamente (basados en mediciones) de otros cuya formulación obedece a la física propiamente dicha relacionada con los fenómenos de propagación de señales.

No obstante, con el advenimiento de la informática se han dado otras orientaciones en lo que a modelamiento matemático se refiere, las cuales incluyen análisis geométricos como el *ray tracing*, y el análisis espaciotemporal que actualmente se encuentra en pleno desarrollo con el objetivo de impulsar nuevas tecnologías de comunicaciones. Una de estas tecnologías novedosas es WiMAX, que opera en bandas de frecuencia y en condiciones para las cuales pocos modelos de canal desarrollados hasta el momento aplican de manera eficiente, debido a que aquellos que ofrecen resultados más aproximados a la realidad han sido construidos empíricamente y su extrapolación a otras bandas de trabajo y condiciones de operación es compleja si se quie-

re garantizar exactitud razonable. Adicionalmente, gran cantidad de modelos consideran solo algunos fenómenos y en consecuencia deben aplicarse varios de ellos antes de obtener un resultado práctico. Es esto precisamente lo que hacen herramientas como ICS Telecom®, que utiliza una interfaz para configurar los parámetros de simulación en lo referente a los modelos de canal a utilizar y fenómenos a considerar; cada fenómeno se simula virtualmente por separado y luego se integran los resultados para entregar una respuesta única.

En cuanto a la clasificación de los fenómenos de propagación, independientemente de cuál sea el fenómeno, el efecto total sobre la señal normalmente es una atenuación o desvanecimiento (*fading*), por lo que dichos fenómenos tradicionalmente se han clasificado como se muestra en la Figura 2. Con esta figura se puede explicar por qué algunos modelos aplican sólo a sistemas banda angosta, o por qué en ciertos ambientes es más determinante un efecto que otro.

De los fenómenos presentes, aquel que ha sido más analizado en lo que va ejecutado del proyecto son las pérdidas de trayecto o *path losses*, pues comprenden un alto porcentaje de las pérdidas totales que experimenta la señal WiMAX al propagarse, incidiendo fuertemente en la cobertura del sistema y en las tasas de transmisión alcanzables. Los otros fenómenos como la multitrayectoria se describen/analizan generalmente con modelos basados en *taps* y las pérdidas estimadas se adicionan a aquellas sucedidas en el trayecto de propagación. No obstante, antes de entrar

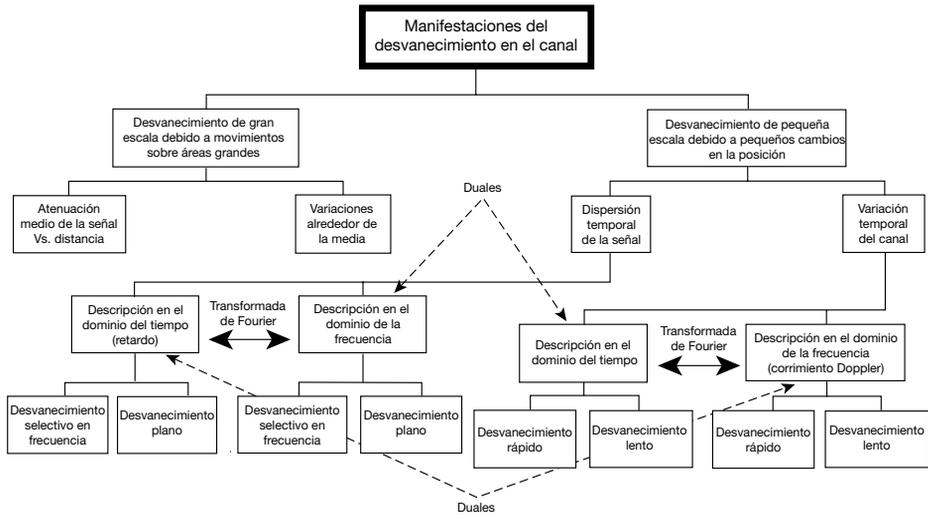


Figura 2. Diferentes tipos de desvanecimiento [7].

en la descripción de estos análisis se presentarán en seguida algunos de los resultados de la primera fase del proyecto, consistente en la clasificación general de los modelos de canal aplicados en radiocomunicaciones.

III. CLASIFICACIÓN GENERAL

Durante la revisión bibliográfica para el desarrollo de la primera fase del proyecto se encontraron diversas clasificaciones y descripciones de los modelos de canal desarrollados hasta el momento por varios autores, pero dichas clasificaciones, como las presentadas en [5], [6] y [7], se concentran casi exclusivamente en la descripción superficial de los modelos revisados, mas no en la generación de una herramienta que permita “escoger” un modelo determinado para que sea aplicado en el diseño o estudio de un sistema particular. Por tal motivo se fijó desde el principio que uno de los objetivos del proyecto sería el desarrollo de una tabla general de clasificación para los modelos de ca-

nal más importantes con los cuales se cuenta en la actualidad. Para la clasificación se tuvieron en cuenta inicialmente aspectos como la banda y los ambientes de aplicación, al igual que las aplicaciones propiamente dichas (ver Figura 3), para posteriormente pasar a detallar un amplio conjunto de aspectos que se encuentran identificados en la Tabla I.

Tabla I. Aspectos considerados en la clasificación de los modelos de canal inalámbricos.

Tipo	Proponentes
Tipo de zona de aplicación	Aplicación (Tecnologías)
Ambiente de aplicación	Otras consideraciones para su aplicación
Clutter general	Formulación matemática
Banda(s) de aplicación	Descripción de parámetros
Selectividad en frecuencia (WB o NB)	Variables de entrada
Área de predicción	Variables de salida
Exactitud	Complejidad computacional
Generalidad	Formulación lógica
Implementado en software	Referencias
Edad [¿En desarrollo?]	Enlaces y referencias

En total, se clasificaron 50 modelos de canal inalámbricos de acuerdo con los aspectos y parámetros mencionados (ver Tabla II), y se cuenta con des-

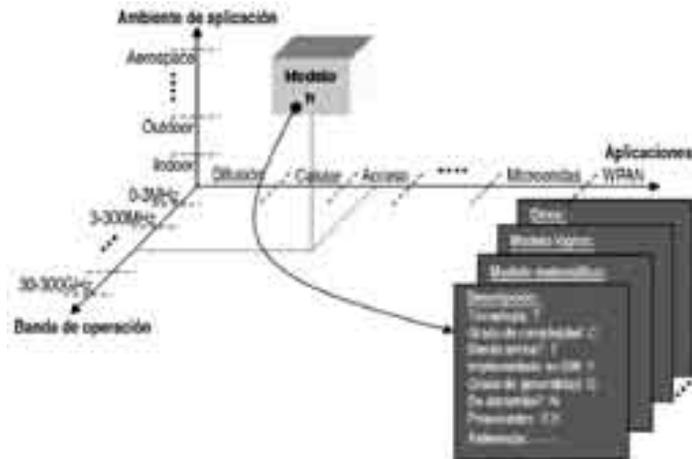


Figura 3. Descripción de la tabla de clasificación de modelos de canal.

cripciones breves de la formulación matemática y lógica, además de las referencias completas para cada uno

de ellos en caso de que quien utilice la tabla necesite profundizar más en un modelo particular.

Tabla II. Modelos de canal clasificados.

Fiss model	Partition losses models
2-ray model (ground reflection)	Ericsson multiple breakpoint model
Knife-edge diffraction model	Attenuation factor model
Multiple knife-edge diffraction model	One slope model
Longley-Rice model	Motley Keenan model
Durkin's model	Multi wall model
Okumura-hata model	Radar cross section model
COST231 - Okumura-Hata model	Log-normal shadowing model
COST231 - Walfisch-Ikegami model	Clarke's model for flat fading (TAP based model)
Okumura-Hata at 3,5GHz	2-ray Rayleigh fading model
Walden FWA model for 3,5GHz	Saleh-Valenzuela statistical model
Saunders-Bonar model	SIRCIM statistical model
Ibrahim-Parsons model	SMRCIM statistical model
Allsebrook-Parsons model	IHE model
Dual slop model	ECC-33
Walfisch-Bertoni model	Time dispersion models (Delay spread - TAPs models)
Lee model	Frequency dispersion models (Doppler spread)
Loo statistical model	Blaustein-Anderson models
Corazza model	2D/3D standard ray tracing
Lutz model	2D/3D intelligent ray tracing
Rural dominant path model	ITU-R model (P.840 y P.838)
Urban dominant path model	Crane model
Indoor dominant path model	Emiliani
Blaunstein models	ITU-R model (P.618)
Street canyon model	Rayleigh based models
2D/3D standard ray tracing	
2D/3D intelligent ray tracing	

Algunos de los modelos estudiados ya han sido implementados en MatLab® para realizar análisis comparativos, y un subconjunto de ellos –específicamente los macrocelulares– fue implementado en el software de simulación JavaDES® desarrollado por el MSc. Roberto Hincapié, del GIDATI. En dicha implementación no solo fueron considerados los efectos de propagación sino que también se incluyeron aspectos relacionados con los modelos de movilidad y las distribuciones de tráfico en sistemas predominantemente celulares. La Figura 4 muestra una captura de la interfaz de simulación del JavaDES.

No obstante, la tabla general de clasificación aún se encuentra en proceso de revisión y depuración para incrementar la utilidad de la herramienta que constituye dicha clasificación.

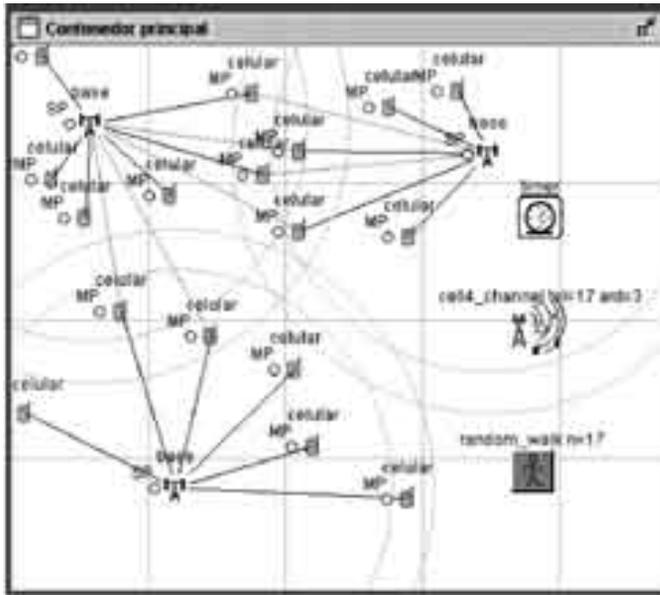


Figura 4. Ambiente de simulación del JavaDES® [11].

IV. MODELOS APLICADOS A WiMAX

Como se mencionó anteriormente, la segunda fase del proyecto consiste en estudiar de manera más profunda un subconjunto de los canales clasificados en la fase inicial, centrando el interés en aquellos que aplican particularmente al estándar IEEE 802.16-2004 (WiMAX). En [8] y [9] se describen los modelos de canal inicialmente sugeridos en el interior del IEEE 802.16 WG para la simulación de los sistemas FWA.³ Para el caso particular de interés es importante tener en cuenta que la condición en la cual operarán normalmente las redes WiMAX será una condición de NLOS, por lo que los modelos que asumen LOS deben ser desde ya obviados en el análisis a realizar. Para el canal en condiciones de NLOS la señal puede

experimentar dispersión, difracción, cambios de polarización y reflexión, factores que afectan la intensidad de la señal recibida. Se han desarrollado varios modelos que procuran caracterizar este ambiente de RF⁴ y permitir la predicción de la intensidad de la señal de RF en recepción, los cuales en su mayoría están basados en medidas empíricas y son utilizados actualmente para predecir la cobertura a gran escala en sistemas celulares. Estos modelos proporcionan estimaciones de las pérdidas de trayecto considerando la distancia entre el transmisor y el receptor, factores del terreno, altura de las antenas y frecuencias de operación. Desafortunadamente ninguno de estos acercamientos trata adecuadamente las necesidades y las condiciones de los sistemas FWA.

³ FWA: Fixed Wireless Access.

⁴ RF: Radio Frequency.

En [2] se afirma que AT&T ha realizado una gran cantidad de mediciones en varias áreas a través de los Estados Unidos para modelar con mayor exactitud el ambiente fijo inalámbrico de RF. El modelo empírico de AT&T ya ha sido validado contra el despliegue de sistemas de acceso fijo inalámbrico y ha arrojado resultados comparables. Este modelo es la base de un modelo aceptado en la industria y es utilizado por los grupos de estandarización como el IEEE 802.16 WG. El modelo de pérdidas de trayecto de AT&T incluye parámetros como las alturas de antena, la frecuencia portadora y el tipo del terreno (clutter).

Así mismo, la Universidad de Stanford desarrolló hace un par de años un conjunto de modelos de canal para la simulación del fenómeno de multi-trayectoria en sistemas LMDS.⁵ Estos modelos se denominan Stanford University Interim Models (comúnmente abreviados SUI models). Los seis modelos SUI son una extensión del trabajo de AT&T y aplican para tres categorías de terreno:

- *Tipo A:* Colinas pequeñas con moderada-alta densidad de árboles.
- *Tipo B:* Colinas grandes con baja densidad de árboles, o plano con moderada-alta densidad de árboles.
- *Tipo C:* Plano con baja densidad de árboles.

Estas categorías de terreno proporcionan un método simple más exacto para la estimación de las pérdidas de trayecto sobre el canal de RF en condiciones de NLOS. Al ser estadística su naturaleza [9], el modelo puede

representar una gran gama de las pérdidas de trayecto experimentadas dentro de una comunicación real en la banda de RF. Los modelos SUI fueron seleccionados para el diseño, el desarrollo y la prueba de las tecnologías WiMAX en seis diversos panoramas, SUI-1 a SUI-6, descritos en [9]. Con el uso de estos modelos de canal es posible entonces predecir más exactamente la cobertura que se puede alcanzar con una estación base configurada de una manera determinada, lo que claramente es un apoyo a las actividades de planeación y diseño de redes WiMAX. No obstante, existe un inconveniente práctico con los modelos SUI, y está relacionado precisamente con la clasificación de terreno para la cual aplican, pues ninguno de los seis modelos considera zonas urbanas o urbanas densas que son de hecho donde se esperan los mayores despliegues de infraestructura WiMAX.

Dentro de los modelos macrocelulares clasificados existe una gran variedad de ellos que han sido obtenidos empíricamente a partir de mediciones en condiciones de NLOS, y virtualmente cualquiera de éstos puede ser ajustado/extrapolado para que sea aplicado a la banda de 3,5GHz. La Figura 5 muestra algunas curvas comparativas de la potencia de recepción estimada con varios modelos de pérdidas de trayecto en condiciones equivalentes, donde es notable que en términos generales la diferencia entre sus predicciones es de varios dB.

Por este motivo es de gran importancia la selección del modelo de pérdidas de trayecto a la hora de simular sistemas WiMAX y realizar

⁵ LMDS: Local Multipoint Distribution System.

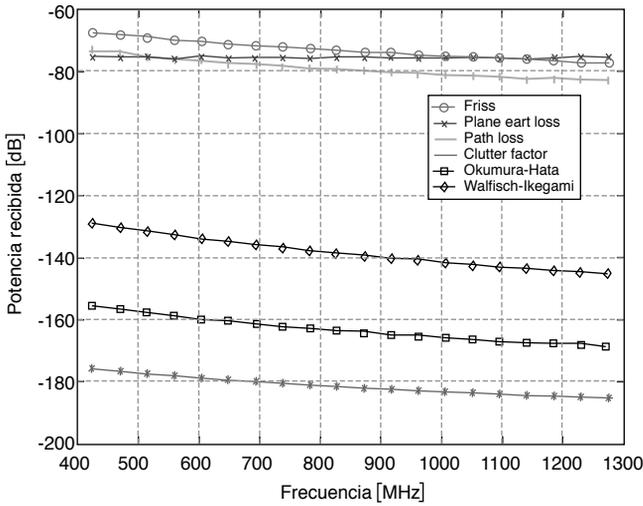


Figura 5. Curvas comparativas de Prx Vs. Frecuencia de operación para varios modelos de *path loss* macrocelulares [11].

las labores de diseño de la red, pues algunos son más optimistas que otros, y no todos aplican igual en las mismas condiciones topográficas. En [8] se describe uno de los modelos de *path loss* adoptado por el IEEE 802.16 WG, el cual da las pérdidas de trayecto según la Ec. 1.

$$\text{Ec. 1.} \quad PL = A + 10\gamma \text{Log}_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s$$

Donde: $A = 20 \text{Log}_{10}(4 \pi d_0 / \lambda)$, con λ dada en metros. γ es el exponente de *path loss* dado por $\gamma = (a - b^2 h_b + c/h_b)$, con la altura de la antena de estación base $10\text{m} < h_b < 80\text{m}$, y a, b y c son constantes dependientes del tipo de terreno. d_0 es una distancia de referencia escogida de 100m. s representa el efecto del ensombrecimiento o *shadowing*, para el

cual se asume una distribución normal con desviación estándar entre 8 y 10 dB.

Adicionalmente, en [8] se describen algunos factores de corrección necesarios para ajustar los modelos a las bandas cercanas a los 2GHz. Debido al ambiente dispersivo, el canal tiene un perfil de retardos por el fenómeno de multitrayectoria. Este modelo de canal dispersivo en tiempo, también presentado en [8], es un típico modelo de multitrayectoria basado en *taps*, y su parametrización conduce a los seis modelos SUI mencionados anteriormente. Para el caso de antenas directivas, el perfil de retardo puede ser representado por una curva caracterizada por el retardo RMS del perfil completo de retardos, el cual está dado por la Ec. 2.

$$\text{Ec. 2.} \quad \tau^2_{RMS} = \sum_j P_j \tau_j^2 - \tau^2_{avg}$$

Donde: $\tau_{avg} = \sum_j P_j \tau_j \cdot \tau_j$ es el retardo de la j -ésima componente del perfil. P_j =(potencia de la j -ésima componente)/(potencia total en todas las componentes).

La curva utilizada para el modelamiento del perfil de retardo está dada por la Ec. 3, y los valores típicos del retardo RMS en el canal inalámbrico están en el rango de 0,1 a 5 μ s. Adi-

cionalmente se considera el efecto Doppler y un factor de corrección K para incluir las características que el canal presenta en condiciones de NLOS, es decir, definirlo como tipo Rice o tipo Rayleigh [8].

$$\text{Ec. 3. } P(\tau) = A\delta_{(\tau)} + B \sum_{k=0}^{+\infty} e^{-k\Delta\tau/\tau_c} (\delta_{(\tau-k\Delta\tau)})$$

Donde: A, B y $\Delta\tau$ se determinan de manera experimental.

En términos generales, para el diseño y optimización de redes FWA, los modelos utilizados son de tipo empírico, tanto para los cálculos de *path loss* (modelos empíricos no dispersivos en el tiempo) como para los análisis de multitrayectoria (modelos empíricos dispersivos en el tiempo).

En [12] son presentados varios modelos empíricos no dispersivos en tiempo, los cuales permiten calcular *path loss* de manera aproximada en la mayoría de los casos. De todos los clasificados, son raros los modelos empíricos que proporcionan información sobre dispersión en el tiempo, y los pocos que existen son muy similares. Al predecir las pérdidas medias en el trayecto basándose en un conjunto de mediciones, podría utilizarse un modelo correspondiente de dispersión temporal para obtener el perfil de retardo temporal de cada curva derivada estadísticamente, o mediante tabulación de datos, siendo ésta una forma de predecir la dispersión en el tiempo causada por algunos ambientes basándose en sus características [12]. Un ejemplo de este tipo de modelos son los SUI descritos anteriormente.

También existe la alternativa de aplicar o desarrollar modelos físicos basados en los principios físicos de la radiopropagación (normalmente

en la óptica geométrica) más que en estadísticas obtenidas de conjuntos de mediciones. Se encuentran muchos modelos de este tipo descritos en la mayoría de la bibliografía existente sobre el tema, pero son modelos cuya exactitud, capacidad y éxito en las predicciones depende de la información que se tenga acerca del ambiente geográfico de operación del sistema en estudio. Estos modelos pueden estar o no orientados a un sitio específico, y no solo deben aplicar las leyes físicas del electromagnetismo sino que deben incluir también una técnica sistemática para “mapear” el ambiente real de propagación dentro del modelo mismo [12]. No obstante, existen modelos físicos no dispersivos en tiempo y orientados a sitio específico, como por ejemplo el modelo geométrico de trazado de rayos en dos dimensiones (*2D Ray Tracing model*), mejor conocido como el modelo de Anderson. Otro ejemplo –posiblemente más conocido– es el modelo Longley-Rice, que ha sido implementado en la mayoría de las herramientas computacionales para diseño de redes inalámbricas y radioenlaces. Este tipo de modelos aplica muy bien para el diseño de redes de acceso fijo inalámbrico; pero hay un tercer grupo de modelos físicos que están orientados a sitio específico y además son dispersivos en tiempo.

Estos modelos aplican las leyes físicas de manera muy precisa sobre cartografía detallada del ambiente real de operación; rastrean la trayectoria de las ondas electromagnéticas cuando dejan el transmisor e interactúan con objetos en el ambiente. Esto no solo proporciona información sobre la dispersión en el tiempo sino también información sobre el ángulo de llegada que es de gran interés para sistemas que utilizan antenas adaptativas, por ejemplo.

Es claro entonces que para la adecuada planeación y diseño de redes WiMAX se necesita la combinación de modelos predictivos tanto de pérdidas medias en el trayecto como de fenómenos de multitrayectoria. En cuanto a los modelos de *path loss*, hasta el momento se han estudiado los mencionados anteriormente más algunas modificaciones realizadas al modelo de Hata descritas brevemente en [10]. Y en lo referente a los modelos de *multipath* y consideración de otros fenómenos, se han revisado los modelos propuestos por Stanford y sus variantes para la banda de 3,5GHz descritas en [8] y [10].

En términos generales, todas las propuestas para el modelamiento de canales aplicable a WiMAX giran en torno a estos modelos y sus variantes. Algunos modelos de *path loss*, como el de Walfish-Ikegami por ejemplo, tienden a ser demasiado optimistas para zonas urbanas, las cuales son de principal interés para los operadores WiMAX, y además tienen el inconveniente de ser aplicables sólo dentro de ciertas bandas de trabajo que no serán de implementación comercial inmediata. El modelo de COST-231 Hata tiene la misma limitación, pero

por ser el modelo tradicionalmente aplicado para el cálculo de *path loss* y para la predicción de niveles de recepción, ha sido extrapolado hasta la banda de 4GHz. El modelo resultante es descrito en [10] de manera comparativa con otros dos modelos: el ECC-33 [13] y el modelo de *path loss* tomado para SUI y adaptado a FWA, como se describió anteriormente.

El modelo de *path loss* de Hata, ajustado y extrapolado hasta 4GHz, muestra que la atenuación en dB tiene una función de distribución de probabilidad gaussiana con media A50 (ver Ec. 4) y determinada desviación estándar (ver Ec. 4). El IEEE 802.16 WG ha adoptado también este modelo como el modelo de *path loss* para el diseño de redes WiMAX, y es más conocido como el modelo ECC-33 [13]. Dicho modelo de propagación es *path loss* con atenuación aleatoria, teniendo en cuenta difracción sobre tejados y múltiples reflexiones para media/alta cantidad de edificaciones, muy típico de Japón, al igual que sus versiones anteriores. Aplica a ciudades grandes y medianas, e indica además correcciones para áreas suburbanas y áreas abiertas. Las distancias límite son menores a 10 km y las alturas de antena oscilan entre 20 y 200 metros. El resultado de la extrapolación es que la señal recibida está dada por:

$$Ec. 4. \quad A_{50} = A_p + A_{bn} - G_c - G_f$$

Donde: $A_{fs} = 92,4 + 20 \log(D) + 20 \log(RF)$, son las pérdidas espacio libre.

$A_{bn} = 20,41 + 9,83 \log(D) + 7,894 \log(RF) + 9,56 [\log(RF)]^2$, pérdida media básica de trayecto.

$G_c = \text{Log}(hc/200) \{13,958 + 5,8 [\text{Log}(D)]^2\}$, ganancia en BS.

$G_r = [42,57 + 13,7 \text{Log}(RF)] [\text{Log}(h_t) - 0,585]$
para ciudades medianas y $G_r = 0,795 h_t - 1,862$ para grandes ciudades. RF en GHz, D en km, hc y ht en m (altura BS y altura SS respectivamente).

Adicionalmente, a los modelos SUI de dispersión temporal –que también son empíricos– se les han realizado algunas modificaciones para aplicarlos a la banda de 3,5GHz, pues su planteamiento original fue para frecuencias entre 2,5 y 2,7 GHz. Como ya se explicó, los modelos SUI definen dos modelos para cada uno de los tipos de terreno (*clutter*) y hacen un total de seis clasificaciones. En [14] los autores exponen algunos aspectos encontrados inconsistentes en los modelos SUI, relacionados con el corrimiento Doppler en multitrayectoria, el perfil potencia-retardo, los patrones de radiación considerados, los valores asumidos para el factor K, y la función de correlación de frecuencia. De cualquier manera, los modelos SUI fueron desarrollados específicamente para uso en la banda de frecuencias de MMDS⁶ en Norteamérica. En [8] se afirma que el modelo podría desempeñarse adecuadamente en el rango de 2 a 4 GHz, el cual incluye las bandas de 3,5GHz que han sido asignadas en Europa y en Colombia para la operación comercial de WiMAX. La ecuación de *path loss* en los modelos SUI fue derivada básicamente de mediciones en áreas suburbanas, y hasta el momento no se han incluido factores de corrección para zonas urbanas o de alta densidad de edificios, ni para zonas rurales. Además, tampoco hay manera de relacionar los tres tipos

o categorías de terreno a los *clutters* comúnmente disponibles o a bases de datos de terreno, así que el método para seleccionar la categoría a aplicar en algún escenario de despliegue de un sistema particular no es sistemático. Las medidas fueron tomadas a distancias cercanas a los 7 km, las cuales son adecuadas para la evaluación de cobertura y servicio; sin embargo, para redes FWA multicelda en las cuales se necesita la reutilización de frecuencias, se requieren los niveles de interferencia de la señal desde celdas que pueden estar alejadas varios radios de celda. Los modelos SUI no ofrecen orientación sobre *path loss* a estas distancias, y como se afirma en [12] se puede esperar que los valores de *path loss* arrojados por los SUI extrapolados a estas distancias pudieran casi ciertamente ser más grandes que aquellos experimentados en los sistemas reales.

Por otro lado, hay gran variedad de modelos basados en la técnica de *ray-tracing*. Dichos modelos físicos –que pueden ser bidimensionales o tridimensionales– han demostrado tener los niveles de exactitud más altos en las pruebas comparativas, como se muestra en [12], limitados casi exclusivamente por el nivel de detalle de la información cartográfica proporcionada. Adicionalmente estos modelos realizan cálculos de reflexión, difracción, rayo directo, multitrayectoria (muy importante en sistemas WiMAX, especialmente en condiciones de NLOS), y respuesta impulsiva del canal, entregando

⁶ MMDS: Multichannel Multipoint Distribution System.

resultados de intensidad de campo, pérdidas de trayecto, *delay spread*, *angular spread*, y respuesta impulsiva del canal. La Figura 6 muestra curvas comparativas de las predic-

ciones realizadas utilizando algunos modelos mencionados, y es clara la superioridad de las técnicas de *ray-tracing* cuando se utiliza cartografía de alta definición.

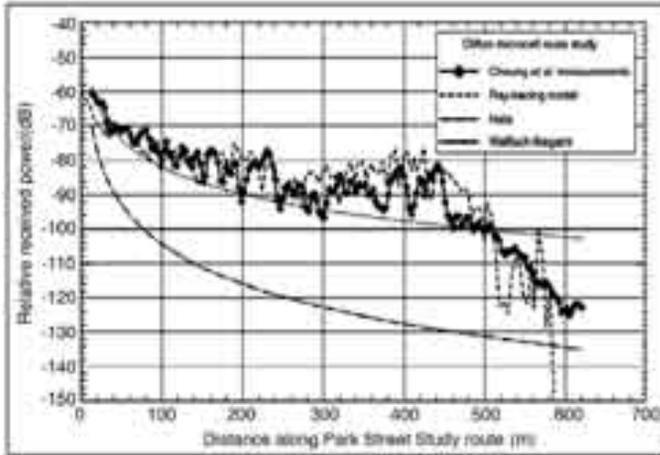


Figura 6. Comparación de modelos predictivos aplicables a diseño de redes WiMAX [12].

V. SIMULACIONES E IMPLEMENTACIONES

Hace un par de años el requerimiento de algunos modelos a los que se les proporcionó información muy detallada del sitio específico en el cual se va a desplegar la red era visto como una desventaja porque se disponía de pocas bases de datos con información de ese tipo. No obstante, en la actualidad existe cartografía de alta resolución de muchas zonas de interés para el despliegue de infraestructura y para el ofrecimiento de servicios, lo que convierte a los modelos físicos —especialmente los geométricos— en muy buenos candidatos para apoyar las actividades de planeación y diseño de redes WiMAX. No obstante, aunque el GIDATI cuenta con cartografía de alta resolución de Medellín, no se ha profundizado aún en el estudio

de este tipo de modelos y hasta el momento se han aplicado las configuraciones que por defecto permite el software ICS Telecom, concentrando la atención por el momento en las implicaciones que tiene la selección de modelo de *path loss* en la exactitud de los resultados.

Para la planeación de redes WiMAX, es entonces de gran interés que los modelos utilizados proporcionen flexibilidad a los procesos y los doten de gran exactitud. Por este motivo, para la investigación actual se han seleccionado cinco modelos para su implementación y para la realización de comparaciones mediante los resultados de simulación:

- *Modelo ECC-33*: Es una modificación del conocido modelo de Okumura-Hata, que permite

ajustarlo a condiciones de operación banda ancha y ambientes de alta influencia multitrayectoria.

- *Modelos SUI*: Son los Stanford University Interim, que en total son seis y actualmente los más aplicados en el estudio de la tecnología WiMAX.
- *3D Intelligent Ray Tracing*: Desarrollado principalmente en Stuttgart University. Es un modelo geométrico algo complejo, pero considerando que se cuenta con información cartográfica detallada, su implementación deberá ofrecer buenos resultados.
- *Urban Dominant Path Model*: También desarrollado en Stuttgart University, es una modificación del anterior que identifica

los trayectos dominantes en la comunicación y considera sólo las señales relacionadas con esos trayectos reduciendo así el volumen de cálculos a realizar.

- *Walden-Rowsell model*: Es un modelo empírico simple de *path loss* presentado en [17], basado en mediciones realizadas directamente en la banda de 3,5GHz. Actualmente se está utilizando este modelo en otro proyecto en el interior del GIDATI para la creación de un modelo genérico de la capa física de sistemas WiMAX sobre Network Simulator 2, debido a que es el que mejor aproximación a datos reales presenta.

En la Tabla III se realiza una comparación de cuatro de los cinco modelos seleccionados.

Tabla III. Comparación de modelos predictivos aplicables a diseño de redes WiMAX.

		Modelos empíricos (SUI y ECC-33)	DPM	3DRT
Escenario	Rural	X	X	
	Urbano	X	X	X
	Interiores	X	X	X
Resultados	Intensidad del campo, Pérdidas de trayecto, Potencia	X	X	X
	Delay Spread			X
	Angular Spread			X
	LOS/NLOS	X	X	X
	Respuesta impulsiva del canal			X
Cálculos	Rayo directo	X	X	X
	Reflexiones		Incluido	Ilimitado
	Difracciones		Ilimitado	2
	Reflexiones y difracciones			XX
	Reflexión, difracción y transmisión		X	X
	Multitrayectoria			X
	Respuesta impulsiva del canal			X
Área de predicción	Áreas grandes	X		
	Áreas medianas	X	X	
	Áreas pequeñas	X	X	X
Exactitud	Cerca del transmisor	Satisface	Muy alta	Muy alta*
	Lejos del transmisor	Limitada	Muy alta	Media*
Tiempo de cálculo	Predicción	Muy baja	Corta	Corta*
	Preprocesamiento	Ninguno	Ninguno	Medio*

* dependiendo de la configuración del modelo (ej. Número de interacciones)

En la actualidad, la mayoría de las herramientas software que asisten actividades de diseño de redes –incluida ICS Telecom de ATDI –, aplican los tres tipos de orientaciones de manera individual. Por ejemplo, como se describe en [16] y [17], es común aplicar modelos de *path loss* como el ITU-R P.525/526 junto con un modelo geométrico de difracción como el de Deygout, una integración media para atenuaciones en subtrayectos, y un modelo geométrico reflectivo 2D o 3D para análisis de multitrayectoria y efecto cañón. La intención entonces de combinar estos diferentes tipos de modelos es la validación de los SUI en actividades de diseño real,⁷ y la aplicación de conceptos de *ray-tracing* en un modelo completo sobre la herramienta ICS Telecom, para lo cual se cuenta con cartografía de alta resolución de la zona metropolitana de Medellín. Como ya se mencionó, con SUI se tiene el inconveniente de que los modelos no aplican a zonas urbanas ni rurales; con el modelo ECC- 33 se tiene el problema de que es el resultado de una extrapolación de un modelo que desde antes se presentaba como demasiado optimista en las predicciones para zonas rurales; y con *ray-tracing* existe un requerimiento en procesamiento que no se tiene con los dos modelos anteriores. La implementación de estos cinco modelos permitirá determinar cuál es la combinación adecuada de orientaciones en modelamiento de canales para el diseño de redes WiMAX.

VI. RESULTADOS OBTENIDOS Y PROYECTADOS

Varios investigadores ya han realizado comparaciones entre los modelos seleccionados y han sacado conclusiones importantes. En [10], los autores analizan brevemente el modelo COST-231 Hata, el modelo ECC- 33 y los modelos SUI aplicados al cálculo de *path loss* y comparan los resultados con mediciones reales. La Figura 7 muestra el resultado gráfico de la comparación para una zona urbana, que como ya se ha dicho es de especial interés para los operadores de redes WiMAX. No obstante, una vez que estos modelos sean implementados en ICS Telecom, se espera que los resultados varíen un poco considerando la topografía colombiana, y precisamente determinar esas variaciones y los factores más influyentes es otro de los objetivos del proyecto. Actualmente se lleva a cabo una campaña de simulación que utiliza la cartografía de alta resolución y la herramienta ICS Telecom con diversas configuraciones de los parámetros del modelo de propagación aplicado, con el objetivo de comparar la incidencia de éstos en las predicciones y determinar posteriormente el grado de aproximación de cada configuración a los datos reales obtenidos mediante pruebas de *drive test*.

En la Figura 8 se muestra la predicción de cobertura para la zona suburbana de la Universidad Pontificia Bolivariana, realizada aplicando el modelo COST-231 Hata, con alturas

⁷ Las simulaciones actuales se están realizando con ICS Telecom nG versión 7. La nueva versión del software cuenta ya con implementaciones de los modelos SUI, lo que proporciona otra alternativa para validación de resultados.

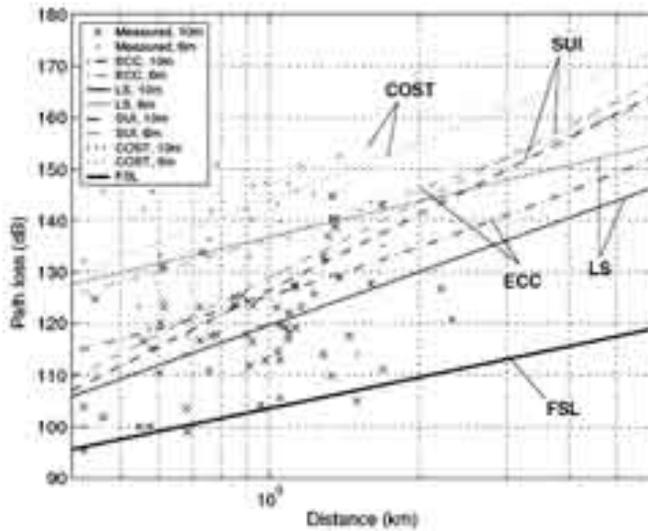


Figura 7. Comparación de modelos empíricos con mediciones en un ambiente típico urbano [10].

de antena de estación base y estación suscriptora iguales a 12m y 4m respectivamente, potencia de transmisión de 1W, antenas omnidireccionales con 14dB de ganancia, banda de

trabajo de 3,5GHz, ancho de banda de canal igual a 1,75GHz y esquemas de codificación/modulación 3/4 64-QAM (aunque el valor de estos dos últimos parámetros es indiferente).



Figura 8. Predicción de cobertura para WiMAX a 3,5 GHz usando el modelo COST-231 Hata.

Si se compara este resultado con el mostrado en la Figura. 9, se observa claramente que el modelo ITU-R 525 es mucho más optimista que COST-231 Hata. En general, los modelos de Hata se comportan más pesimistas

que otros modelos en zonas distintas a Japón, y de hecho, ese fue motivo por el cual se seleccionó el modelo de Walden-Rowcell para el otro proyecto mencionado.



Figura. 9. Predicción de cobertura para WiMAX a 3,5 GHz usando el modelo ITU-R 525.

Las campañas de simulación incluyen una amplia variación de los parámetros de configuración de los modelos, y están llevándose a cabo mientras se termina la construcción de las DLL que permitan realizar simulaciones adicionales de los modelos seleccionados.

Los resultados serán utilizados en el presente proyecto y en otros que se ejecutan de forma paralela al interior del GIDATI, y permiten la validación de resultados y la formulación de propuestas para futuros proyectos.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se describió a lo largo del artículo, debido a las limitaciones citadas los modelos SUI son más apropiados para propósitos de dimensionamiento o de desarrollo de equipos que para la planeación y diseño detallados de la red WiMAX en locaciones específicas. Para propósitos de planeación son más apropiados los modelos físicos que puedan explotar la información detallada que se tenga del terreno, del *clutter*, y de las edificaciones circundantes.

Las simulaciones realizadas han proporcionado información suficiente para empezar a determinar qué factores son los que mayormente impactan en la selección del modelo de canal a utilizar, y cómo esto afecta las actividades de planeación y diseño. De esta manera se presenta la tabla de clasificación de canales como una herramienta propiamente dicha diseñada para asistir en las labores de ingeniería de red y apoyar las decisiones referentes al tema que se ha tratado.

En cuanto a la herramienta ICS Telecom, se ha observado que los resultados que arroja no siguen un comportamiento basado completamente en modelos probabilísticos, pues los resultados siempre son los mismos con las mismas condiciones generales, pero se ha asumido en las campañas que los datos corresponden a valores medios estimados en cada punto de la cartografía.

Finalmente, teniendo en cuenta los objetivos de esta primera fase, de todo el desarrollo se pueden consignar dos conclusiones generales:

- Determinar el “estado del arte” en el modelamiento de canales de radio y clasificar los modelos existentes/disponibles estudiados ha facilitado el desarrollo de las actividades académicas y también de las ingenieriles como la planeación y el diseño de redes inalámbricas.
- El desarrollo de cuadros clasificatorios y comparativos para los diferentes modelos de canal aplicables, permite que la creación y/u optimización de herramientas software para planeación, diseño

y simulación de redes sea más eficiente. Los resultados son en sí mismos un instrumento de estudio e ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la empresa TES América Andina Ltda. por facilitar la cartografía sobre la cual se están desarrollando las campañas de simulación. También al ingeniero Néstor Orlando Bayona Acosta de la UPB por sus aportes en el desarrollo del simulador JavaDES®, y en general a todos aquellos que han colaborado en la ejecución del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE LAN/MAN SC. IEEE Std. 802.16-2004 – Part 16: *Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*. IEEE 802.16 Working Group. Nueva York. 2004. 893p.
- [2] E. Crozier y A. Klein. *WiMAX's technology for LOS and NLOS environments*. WiMAX Forum. Mountain View. 2003. 10p
- [3] A. Aguiar y J. Gross. *Wireless channels models*. Technical University Berlin. Berlín. Telecommunications Networks Group. 2003. 54p.
- [4] S. Saunders. *Antenas and propagation for wireless communication systems*. Londres. John Wiley & Sons. 1999.
- [5] T. Rappaport. *Wireless communications: Principles and practice*. Indianapolis. Prentice Hall. 2002. 736p.
- [6] P. Smulders, *et al.* *State of the art channel modeling*. Broadband Radio@Hand. 2002. 45p.

- [7] T.K Sarkar, *et al.* *A survey of various propagation models for mobile communications*. IEEE Antenas and Propagation Magazine, Vol.45, No.3, junio de 2003. Nueva York. P51-82.
- [8] IEEE 802.16.3c00/47. *Channel Models for Broadband Fixed Wireless Systems*. IEEE 802.16 Working Group. Nueva York. 2000. 7p.
- [9] IEEE 802.16.3c00/49r2. *Interim Channel Models for G2 MMDS Fixed Wireless Applications*. IEEE 802.16 Working Group. Nueva York. 2000. 13p.
- [10] V.S. Abhayawardhana, *et al.* *Comparison of empirical propagation path loss models for Fixed Wireless Access systems*. BT Mobility Research Unit. Ipswich. 2004. 5p.
- [11] A. Galvis, C. Gómez, R. Hincapié y N. Bayona. *Modelamiento de canales inalámbricos: Estado del arte, clasificación y simulación*. Memorias JIDTEL/5° Congreso Nacional ETI – TEC-NOCOM2005. Medellín. 2005. 10p.
- [12] H.R. Anderson. *Fixed broadband wireless systems design*. John Wiley & Sons Ltd. Surrey. 2003. 526p.
- [13] ECC Report 33. *The analysis of the coexistence of FWA cells in the 3,4 – 3,8 GHz band*. ECC/CEPT. Cavtat. 2003. 72p.
- [14] A. Sarajedini, *et al.* *Issues with the interim broadband fixed wireless channel model*. IEEE 802.16 WG y BeamReach Networks. Mountain View. 2001. 7p.
- [15] E. Grenier. *Signal propagation modeling in urban environment*. ATDI. Paris. 2005. 18p.
- [16] *Radio propagation in ICS Telecom: Training resources*. ATDI; Paris. 2005. 66p.
- [17] M. C. Walden y F.J. Rowsell. *Urban propagation measurements and statistical path loss model at 3,5GHz*. IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting. Cambridge. 2005.

CURRÍCULOS

Alexánder Galvis Quintero {alexander.galvis@upb.edu.co} es ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca (Popayán, 2005) y candidato a Magíster en Ingeniería con énfasis en Telecomunicaciones en la Universidad Pontificia Bolivariana.

Actualmente se desempeña como investigador y docente en dicha institución, además de coordinar el Semillero de Tecnologías Inalámbricas (STI). *Temas de interés:* Radiocomunicaciones, modelamiento de canales, Software Defined Radio, coexistencia e interoperabilidad inalámbrica, simulación.

Cristina Gómez Santamaría {cristina.gomez@upb.edu.co} recibió sus títulos de Ingeniera Electrónica y de Magíster en Ingeniería con énfasis en Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana (Medellín, 2002 y 2005 respectivamente). Actualmente es candidata a

Doctora en Ingeniería en la misma institución, y su trabajo está relacionado con el modelamiento de canales espacio-temporales. *Temas de interés:* Radiocomunicaciones, modelamiento de canales, MIMO, WiMAX.

Roberto Carlos Hincapié Reyes
{roberto.hincapie@upb.edu.co}
recibió sus títulos de Ingeniero Electrónica y de Magíster en Ingeniería con énfasis en Telecomunicaciones de la Universidad

Pontificia Bolivariana (Medellín, 1996 y 2004 respectivamente). Actualmente es candidato a Doctor en Ingeniería en la misma institución, y su trabajo está relacionado con el modelamiento de capas superiores de sistemas inalámbricos. *Temas de interés:* Radiocomunicaciones, planificadores, QoS en sistemas inalámbricos, redes *mesh* y *ad hoc*, simulación, WiMAX. ☼

