

Ajuste estadístico de modelos de propagación de señal usando medidas de la ciudad de Cali

Statistical adjustment of propagation models using Cali city measurements

COLCIENCIAS TIPO 1 (RECIBIDO: FEBRERO 14; ACEPTADO MARZO 20, 2012)

Andrés Navarro Cadavid, Ph.D

anavarro@icesi.edu.co

Carlos Andredy Ardila

caardila@icesi.edu.co

Grupo de investigación i2t, Universidad Icesi, Cali - Colombia

Resumen

La dificultad de estimar con exactitud la influencia de los obstáculos, los edificios y el terreno en la pérdida de trayectoria de la señal hace que los modelos de propagación, generalmente utilizados para la planificación de redes inalámbricas externas, en entornos urbanos incluyan algunos elementos empíricos. Por lo tanto, la ecuación final generalmente contiene constantes y coeficientes para los diferentes términos, que se obtienen principalmente a partir del análisis estadístico de mediciones recolectadas durante actividades de *drive test* en grandes áreas de la ciudad. Desafortunadamente, estos resultados son realmente válidos únicamente para las áreas de la ciudad en las que se obtuvieron y, en el mejor de los casos, para áreas o ciudades similares. Sin embargo, si el nivel de similitud no es suficiente, es necesario realizar ajustes, un proceso que resulta en la formulación de nuevas constantes y nuevos coeficientes. El propósito de este artículo es discutir algunos de los hallazgos obtenidos durante el proceso de ajuste estadístico al escenario de la ciudad de Cali, de los modelos Okumura-Hata, Stanford University Interim (SUI) y Walfisch-Bertoni, usando mediciones.

Palabras clave

Radiocomunicaciones; modelos de propagación; calidad /confiabilidad de la comunicación; ajuste de modelos; escenario de referencia.

Abstract

Propagation models normally used to plan outdoor wireless networks on urban environment, tend to include a number of empirical elements. These are derived from the difficulties of accurately estimate the influence of obstacles, buildings and terrain in the signal path loss. Therefore, the final equation usually contains constants, and coefficients for the different terms, mainly obtained by statistical analysis of measurement sets, collected during drive tests on large areas of the city. Unfortunately, such results are only truly valid for the city or parts of the city on which the measurements were taken. They may also be considered appropriate for similar areas or cities at the most. If the areas are not similar enough however, adjustments are necessary, resulting in the formulation of new constants and coefficients. The purpose of this paper is to discuss some of the findings during the process of statistically adjust the Okumura-Hata, Stanford University Interim (SUI) and Walfisch-Bertoni models to the Cali scenario, using measurements.

Keywords

Radio Communications, Propagation Models, Communications Quality & Reliability, Models adjustment, Reference Scenario.

I. INTRODUCCIÓN

Modelos de propagación empíricos y semideterminísticos como Hata, Walfisch-Bertoni, Deygout, Stanford University Interim (SUI) y otros, son aún ampliamente utilizados en la planeación y optimización de redes inalámbricas (Abhayawardhana, Wassell, Crosby, Sellars, & Brown, 2005), porque suelen ser suficientes para las labores de planificación de redes de tercera generación y tecnologías similares. Estos modelos ofrecen un interesante balance entre precisión, velocidad de ejecución y facilidad de implementación. Sin embargo, dada su naturaleza empírica, suelen depender de las características físicas del área para la que fueron desarrollados originalmente y de las medidas usadas para su calibración inicial, lo que puede dar como resultado un amplio margen de error al ser utilizadas en zonas radicalmente distintas. Este fenómeno ha sido estudiado durante años por la comunidad científica.

La ciudad de Cali, al igual que la mayoría de los centros poblados en la región andina, exhibe una diversa configuración de escenarios geográficos y urbanos. Las edificaciones se encuentran dispuestas en patrones irregulares, en valles, sobre colinas o incluso en zonas montañosas, con una vasta vegetación distribuida de manera impredecible. Debido a estas características, la ciudad ha sido propuesta como un Escenario de Referencia en la acción COST 2100 - mayor información sobre este escenario puede encontrarse en Navarro (2008)-.

Las diferencias con las ciudades europeas, japonesas y norteamericanas, para las que fueron originalmente desarrollados, justifican la realización de ajustes a los modelos para las ciudades latinoamericanas. Si bien existen trabajos previos sobre este tema (Cadvar, 2001; Sharma & Singh, 2010), los escenarios empleados aún difieren substancialmente del usado en esta investigación.

Este artículo expondrá un análisis estadístico basado en regresión lineal, usado para ajustar tres modelos típicamente utilizados en la industria y en la academia: Okumura-Hata (Hata, 1980), Stanford University Interim (SUI) - también conocido como el modelo de Erceg (Erceg et al, 2003) que es bastante utilizado en la planificación de redes- y Wimax, y Walfisch-Bertoni (Walfisch & Bertoni, 1998). El objetivo es mejorar la precisión de dichos modelos tradicionales sobre el escenario de referencia COST 2100 (Cali). El paquete

estadístico Minitab™ fue utilizado con este propósito, en conjunto con una enorme base de datos de medidas.

Adicionalmente, se compararán dichos resultados con los obtenidos mediante una herramienta comercial y con un modelo basado en trazado de rayos, a fin de extraer conclusiones sobre la utilidad de dichos modelos de alta precisión en las labores de planificación.

Este documento tiene la siguiente estructura: la sección II describe los parámetros de la simulación y la base de datos de medidas. La sección III trata sobre los ajustes realizados al modelo de Hata y los resultados obtenidos. La sección IV habla sobre el modelo SUI. La V sobre Walfisch-Bertoni. En la sección VI se discuten los resultados obtenidos con la herramienta comercial y el modelo de trazado de rayos. Finalmente, en la sección VII se esbozan algunas conclusiones y posibles trabajos a futuro.

II. BASE DE DATOS DE MEDIDAS Y PARÁMETROS

Para realizar el análisis, se utilizó una base de datos de 35.313 medidas de intensidad de señal, compilada por un operador local de telecomunicaciones mediante la técnica de *drive test* en un área de 9 kilómetros cuadrados.

Se utilizó un sistema de *drive test* comercial, frecuentemente utilizado por operadores locales, fabricado por Comarco™, consistente en un transmisor de onda continua, ubicado en una localización conocida como El Limonar, un importante sector en los suburbios de Cali. Esta zona incluye sectores comerciales y residenciales con algunas pequeñas zonas boscosas. La disposición de las edificaciones es, sin embargo, bastante regular en algunas áreas, favoreciendo las condiciones requeridas por el modelo de Walfisch-Bertoni.

Como se mencionó, las medidas de Navarro et al. (2009) tenían algunos problemas de posicionamiento, derivados de un error en la configuración del dispositivo GPS usado durante los *drive test*; un ajuste manual consistente en el desplazamiento lineal de algunos cientos de metros al norte y hacia el sur fue necesario para lograr consistencia con la disposición urbana. El resultado final (mostrado en la Figura 1) se considera satisfactorio.

Se evaluaron otros conjuntos de medidas, incluyendo aquel tomado alrededor de la Plaza de Caicedo (Navarro et al, 2009).

Figura 1. Primer kilómetro alrededor del transmisor



El conjunto del Limonar, sin embargo, mostró más precisión frente a los modelos sin ajustar, y cuando se probaron los modelos ajustados con los otros conjuntos, se obtuvieron resultados similares y beneficios comparables a los alcanzados sobre dicho conjunto.

Tabla 1. Parámetros de las pruebas de campo

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia efectiva	48.6	dBm
Altura del Transmisor	40	Mts
Altura del Receptor	1.8	Mts
Frecuencia	900	MHz

Una antena BCD-8007 omnidireccional fue usada en el transmisor. La ganancia de la antena receptora era inferior a 1 dBm.

III. AJUSTES AL MODELO DE HATA

La ecuación para calcular las pérdidas de señal según Hata (1980) contiene cuatro términos que dependen enteramente de la distancia desde el transmisor (d), la frecuencia (f), las alturas de la estación base (b_B) y los receptores (b_M). Las pérdidas varían linealmente con los logaritmos en base diez de estas variables.

$$L_u = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_B - C_H + [44.9 - 6.55 \log h_B] \log d$$

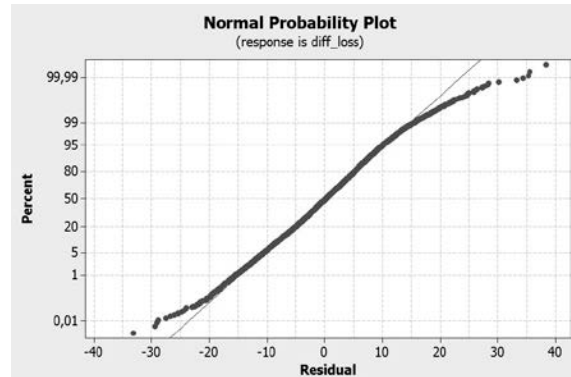
$$C_H = 0.8 + (1.1 \log f - 0.7) h_M - 1.56 \log f \quad (1)$$

Dado que los demás valores (frecuencia y alturas) son constantes para cada medida, es posible utilizar un proceso de regresión lineal para hallar un nuevo coeficiente para el logaritmo de la distancia, generando una nueva ecuación en función de dicho término.

Este procedimiento consiste en agregar a la hoja de trabajo de Minitab™ columnas que contienen la totalidad de las medidas así como sus coordenadas planas (geoproyectadas), usualmente en metros. Posteriormente se adiciona otra columna ($\log R$) con el logaritmo de la distancia (en kilómetros) entre el sitio de cada medida y la estación base.

Una columna más (*diff_loss*) debe agregarse con el valor de la ERP menos el valor de cada medida; sobre esta columna se ejecuta la regresión lineal en función de $\log R$. El resultado de este proceso se muestra en la Figura 2 y en la Ecuación 2.

Figura 2. Test de normalidad para el modelo ajustado



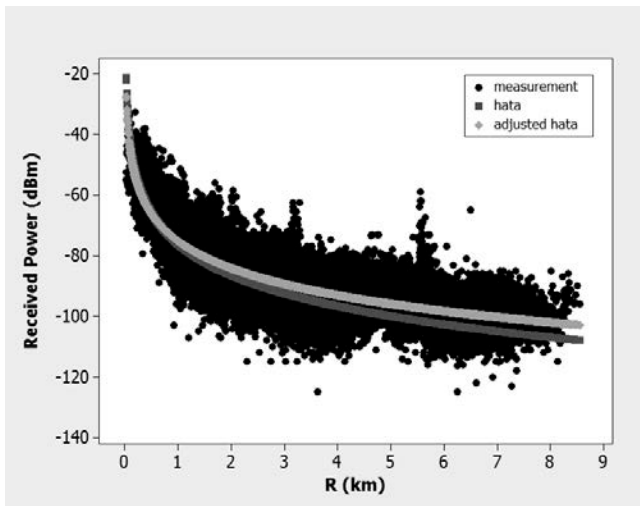
Puesto que la distancia es el único término que varía en esta aproximación, la Ecuación 2 puede ser utilizada para reconstruir la ecuación original, pero con nuevos coeficientes, el resultado se muestra en la Ecuación 3.

$$diff_loss = 123.84 + 29.65 \log R \quad (2)$$

$$L_u = 70.18 + 26.16 \log f - 13.83 \log h_B - C_H + [40.14 - 6.55 \log h_B] \log d \quad (3)$$

Utilizando esta variación, el 96.9% de los valores simulados muestran una desviación inferior a 14 dBms frente a las medidas, y el 74.6% menos de 7 dBms, en comparación al 96.7 % y el 71.4 % respectivamente, obtenidos con el modelo original (ver Figura 3).

Figura 3. Comparativa entre las medidas, el modelo original y el ajustado



El procedimiento descrito anteriormente asume dos cosas sobre el modelo original: que las características físicas del área corresponden al *clutter* urbano, según la definición de Hata (1980). Y que, contrario a una de las restricciones del modelo, los resultados también son válidos para el primer kilómetro.

Con el fin de probar estas hipótesis, se calcularon la media y la desviación estándar del error sobre las medidas, usando diferentes variaciones del modelo. Todos los valores en esta y las siguientes tablas están en dBms.

Tabla 2. Valores estadísticos para el error en Hata

Error	Media	σ	Cuartil 1	Cuartil 3
Modelo original - <i>clutter</i> urbano	-1.39	6.47	-1.9	6.58
Modelo original - <i>clutter</i> urbano-denso	-2.27	6.48	-2.77	6.71
Modelo original – primer kilómetro, <i>clutter</i> urbano	-1.57	7.05	-1.86	6.82
Modelo ajustado - <i>clutter</i> urbano	0.0	6.32	-4.12	4.00

Puede verse en la Tabla 2 que el *clutter* urbano es más adecuado que el urbano-denso para la zona sur de la ciudad de Cali (muy similar a las zonas residenciales de muchísimas ciudades en Colombia y Latinoamérica), y que los resultados para el primer kilómetro no están significativamente más desviados que los de las demás zonas.

Como se esperaba, el ajuste mejora los resultados del modelo de Hata, si bien de manera discreta.

IV. AJUSTES AL MODELO SUI

El modelo Interino de la Universidad de Stanford (SUI) es un modelo empírico que requiere la caracterización de cada zona de la ciudad de acuerdo con un tipo de terreno (Erceg et al, 2003). Define tres de estos tipos de terreno:

Tipo A: asociado a la mayor cantidad de pérdidas, adecuado para terreno montañoso o con colinas, y con moderada o abundante presencia de vegetación.

Tipo B: tipo intermedio; puede tratarse de terreno llano con bastantes arboles o terreno montañoso con poca vegetación.

Tipo C: asociado con la mínima pérdida, apropiado para terreno llano con poca vegetación.

Esta es la expresión matemática básica del modelo:

$$PL = A + 10\gamma \log \left[\frac{d}{d_0} \right] + X_f + X_h + s$$

$$A = 20 \log \left[\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right] \quad \gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b}$$

$$X_f = 6 \log \left[\frac{f}{2000} \right] \quad X_h = H \log \left[\frac{h_r}{2000} \right] \quad (4)$$

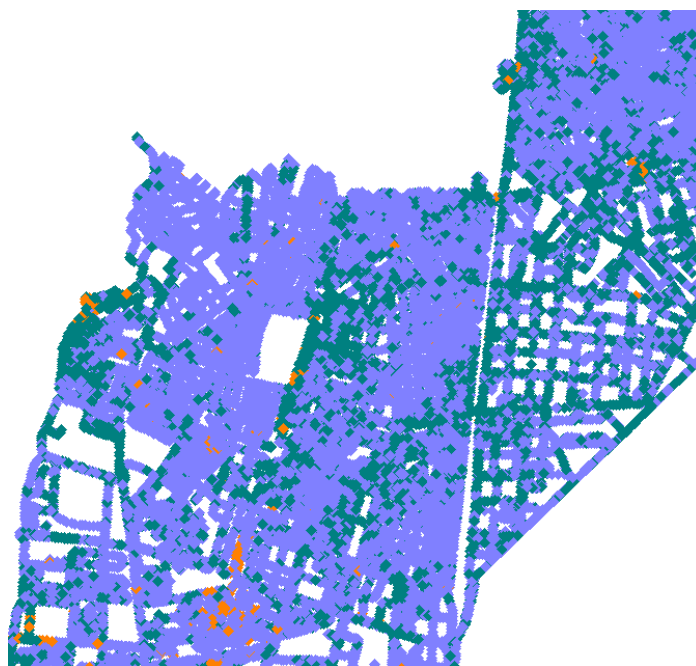
Donde d es la distancia entre transmisor y receptor en metros, $d_0 = 100$ metros, h_b es la altura de la estación base en metros, h_r la altura promedio del receptor en metros, f es la frecuencia en MHz, λ es la amplitud de onda e metros, s es el efecto de desvanecimiento, X_f y X_b son factores de corrección para la frecuencia y la altura del receptor, respectivamente; y γ es el exponente de pérdidas por dispersión. Las constantes se calculan con ayuda de la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros empíricos para el modelo SUI

Parámetro	Terreno A	Terreno B	Terreno C
A	4.6	4.0	3.6
B	0.0075	0.0065	0.005
C	12.6	17.1	20
S	10.6	9.6	8.2
H	10.8	10.8	20

El ajuste inicial se realizó exactamente de la misma forma que con el modelo de Hata. Se obtuvo una ecuación simplificada en términos de la distancia mediante regresión lineal, que fue usada para reescribir el modelo original planteado en la Ecuación 4. En esta ocasión, sin embargo, la influencia del factor *clutter* fue determinante. La predicción más cercana a la medida fue usada en cada caso, usando cada uno de los tres tipos de terreno. La Figura 4 muestra la elección de tipo de terreno para cada medida. Se pudo constatar mediante observaciones de campo, que las características físicas de las distintas zonas concuerdan con las descripciones mencionadas por el modelo: "alta densidad de árboles", "terreno llano", etc.

Figura 4. Distribución de *Clutters*: más oscuro, mayor vegetación



Cada tipo de terreno produjo ecuaciones distintas. Se usó el promedio de los tres coeficientes para el logaritmo de la distancia. La constante de ajuste K fue calculada para el tipo de terreno C, y solo una mínima variación fue introducida para el terreno A. El resultado final se muestra en la Ecuación 5.

$$PL = A + 7.1\gamma \log \left[\frac{d}{d_0} \right] + X_f + X_h + s - K \quad (5)$$

$K=44.5$. $H = 12.6$ solo para el terreno A. Las demás ecuaciones permanecen inalteradas como en la Ecuación 4. El resultado del análisis se resume en la Tabla 4.

Tabla 4. Estadísticas del error en el modelo SUI

Error	Media	σ	Cuartil 1	Cuartil 3
Modelo original –terreno C	58.1	6.95	53.45	62.88
Modelo ajustado – terreno B	-0.87	6.31	-4.87	3.26
Modelo ajustado – todos los terrenos (coeficientes promediados)	0.41	4.05	-1.92	2.57

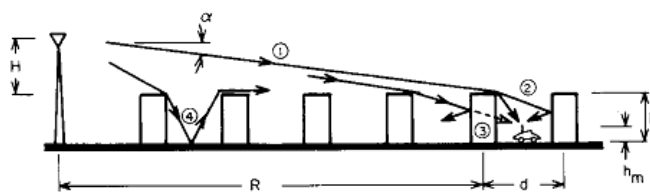
Sin ninguna corrección, el error en el modelo original es demasiado pronunciado para ser de alguna utilidad; pero con los ajustes propuestos, predice el 99% de los valores con un error inferior a 14 dBms, 91.7% con menos de 7 dBms, y un sobresaliente 64% con menos de 3 dBms de error; ningún otro modelo puede superar la barrera del 40% en esta categoría.

V. AJUSTES AL MODELO WALFISCH-BERTONI

El modelo de Walfisch-Bertoni es una conocida aproximación semideterminista a la estimación de pérdidas de señal, que toma en cuenta las múltiples difracciones sobre los techos de las edificaciones. Para ello se agregan unas "pérdidas adicionales" a las pérdidas por propagación en espacio libre.

Para este análisis se ha utilizado el modelo original descrito por Walfisch y Bertoni (1998), y no se consideran las distintas correcciones que se han hecho al modelo a lo largo de los años. El modelo requiere dos parámetros adicionales a la distancia: la separación entre los obstáculos (d) y la altura promedio de los edificios (h), como muestra la Figura 5.

Figura 5. Esquema gráfico del modelo de Walfisch-Bertoni



$$L_{ex} = 57,1 + A + \log f_c + 18 \log R_k - 18 \log H - 18 \log \left(1 - \frac{R_k^2}{17H} \right) \quad (6)$$

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 + (h - h_r)^2 \right] - 9 \log d + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2(h - h_r)}{d} \right] \right\} \quad (7)$$

Para calcular estos parámetros se utilizó una herramienta desarrollada por el equipo de investigación: CellGis. Esta herramienta puede encontrar el "perfil de las alturas del terreno" entre transmisor y receptor, mediante una adaptación del algoritmo de Bresenham para dibujar líneas (Bresenham, 1965). Una imagen del primer kilómetro alrededor del transmisor con la distribución de obstáculos hallada por CellGis se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Distribución de obstáculos calculada con CellGis



Analizando las variaciones de altura entre los puntos adyacentes de los perfiles, la herramienta es capaz de encontrar los parámetros d y b , que son: la distancia entre los edificios (el ancho de las calles) y la altura de los edificios, respectivamente; para cada punto del perfil. Además, como el modelo original requiere que el transmisor esté ubicado sobre los techos de los edificios, se llevó a cabo una verificación adicional sobre los datos para prevenir que valores atípicos afectaran negativamente el análisis:

1) Si la altura no estaba contenida entre el percentil 10 y 90 de toda la distribución de la variable altura, se le reemplazaba por la media estadística.

2) Si la altura era superior a la del transmisor, se le descartaba, pues se trata de una restricción fundamental del modelo (Walfisch & Bertoni, 1998).

Una vez realizados los ajustes, se agregaron como nuevas columnas a la hoja de trabajo de Minitab™.

Tratándose de un modelo semideterminístico, solo la parte empírica de la ecuación puede ajustarse. Por lo tanto el término "A" (Ecuación 7), que describe los efectos de la geometría de los edificios alrededor del receptor, no puede ser incluido dentro del análisis estadístico; solo se usa para balancear la ecuación.

Por otra parte, el componente de múltiples difracciones sobre edificios, constituido por los últimos tres términos de la Ecuación 6 que, por medio de identidades logarítmicas, pueden agruparse en un solo término (Ecuación 8) que varía linealmente con un solo coeficiente.

$$FR = 18 \log \left[\frac{17R}{17R - R^2} \right] \quad (8)$$

El término FR es el factor de pérdidas asociadas a la distancia (R) y fue agregado como una nueva columna en la hoja de trabajo de Minitab™ para ser usado en el proceso de regresión lineal descrito en la sección III. El resultado es la Ecuación 9.

$$diff_loss = -55,73 - 7.76 FR \quad (9)$$

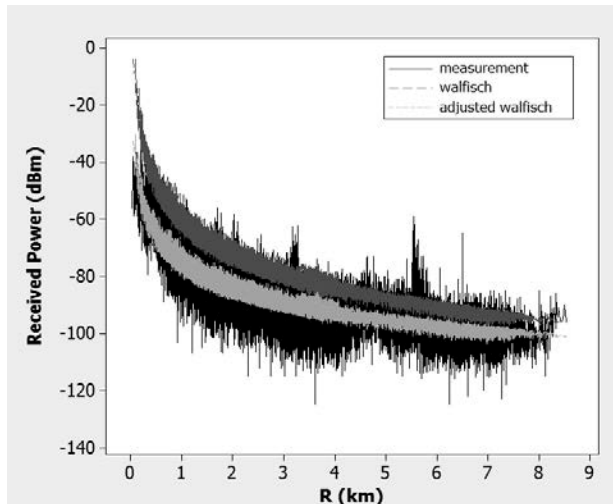
Al igual que con los modelos anteriores, esta ecuación permite describir el modelo original, resultando en la Ecuación 10.

$$L_{ex} = 55.73 + A + \log f + 7.76 \log R - 7.76 \log H - 7.76 \log \left(1 - \frac{R^2}{17H} \right) \quad (10)$$

Con este ajuste, el 97.05% de los valores calculados tienen un error inferior a 14 dBms y el 75.42% a 7 dBms. El modelo original predice 75.32% y 39.18% en estas categorías. 8652 medidas fueron descartadas por las restricciones del modelo. Los valores estadísticos para el modelo antes y después del ajuste se resumen en la Tabla 5 y Figura 7.

Tabla 5. Estadísticas del error en el modelo Walfisch-Bertoni

Error	Media	σ	Cuartil 1	Cuartil 3
Modelo original	-9.22	7.18	-13.91	-4.19
Modelo ajustado	0.0	6.29	-3.96	4.07

Figura 7. Comparación entre medidas, modelo, y modelo ajustado

VI. RESULTADOS USANDO UNA HERRAMIENTA COMERCIAL

También se hicieron simulaciones usando una herramienta comercial (ICS TelecomTM v.9) -si bien para un área diferente del escenario de referencia COST 2100-, con el fin de comparar los resultados de los ajustes hechos a los modelos en este trabajo con los de los modelos típicamente implementados en este tipo de herramientas. Estos resultados ya han sido descritos en el trabajo de Navarro, Ardila y Mejía (2009), y son extremadamente inexactos. Sin embargo, se ha establecido que estos resultados fueron influidos por una configuración inadecuada de la herramienta. Por lo tanto, la simulación fue realizada nuevamente para este artículo. Los valores originales y los obtenidos durante la nueva simulación se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Estadísticas del error en el modelo Hata en ICS

Error	Media	σ
Resultados (Navarro et al, 2009)	63.206	30.86
Nuevos resultados	14.34	8.6

Por otra parte, los resultados de simulaciones realizadas con un modelo de trazado de rayos en el área de Plaza Caicedo (cercana a El Limonar), se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Estadísticas del error con el modelo de Ray Tracing en Plaza Caicedo (Navarro & Guevara, 2010)

Media	σ
4.05	4.01

Se puede apreciar que los resultados arrojados por modelos empíricos son bastante similares a los obtenidos mediante un modelo de trazado de rayos; sin los retos en términos de complejidad de cómputo que dichos modelos ofrecen.

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Un análisis estadístico sobre los resultados de mediciones de campo logra mejorar el desempeño de los modelos empíricos y semideterminísticos, haciéndolos superiores a los modelos presentes en herramientas comerciales y apropiados para realizar tareas de planificación y control en el escenario de la ciudad de Cali, y probablemente para ciudades con topología similar. Estos ajustes son válidos para tecnologías hasta el rango de frecuencias asociado a sistemas de "tercera generación" (3G). Para redes post-3G, los modelos de trazado de rayos, que toman en cuenta la información del canal, son más adecuados.

El modelo de Hata es aún una valiosa herramienta para la planificación de redes de comunicación inalámbrica, por lo menos en las etapas iniciales, con un rango aceptable de error entre los 7 y 14 dBms. La mejoría con el ajuste estadístico es discreta, pero la validación del tipo de *clutter*, y de la viabilidad de usar el modelo para el primer kilómetro, son aportes valiosos que contribuyen a la confiabilidad del modelo.

El modelo SUI es una alternativa viable al modelo de Hata para el escenario de Cali, pero solo después de un cuidadoso ajuste. A pesar de haber sido inicialmente formulado para el rango de 2.5 a 2.7 GHz, con las correcciones propuestas sobrepasa la precisión de todos los demás modelos, pero sin perder la simplicidad de un modelo empírico. Sin embargo, se requiere de un mapa de *clutters* con información sobre los tipos de terreno en el área, para alcanzar estos niveles de precisión.

El modelo de Walfisch-Bertoni es el que obtiene los mayores beneficios de una optimización por medios estadísticos. Pero a pesar de que es bastante preciso para una buena parte del escenario, sus restricciones intrínsecas evitan que pueda funcionar apropiadamente sobre más del 25% del escenario, además de no representar una mejoría significativa sobre el modelo de Hata, y de no alcanzar los niveles ofrecidos por el modelo SUI. Es aconsejable explorar variaciones o alternativas a este modelo para futuros procesos de análisis estadístico.

Por otra parte, el proceso de obtener información detallada sobre la distribución de los obstáculos y edificaciones en un perfil de terreno es un logro meritorio, que puede ser mejorado, y que constituye la base para la implementación de modelos más avanzados, con los que tal vez se logren optimizaciones más efectivas de las expuestas en este artículo.

Una correcta simulación de la propagación de la señal en la planificación de redes nuevas, o en la evaluación de redes existentes, es una tarea esencial para determinar el impacto ecológico que representan para la población o el medio ambiente. Modelos más precisos pueden ayudar a reducir el número de transmisores y a regular sus niveles de potencia, lo que redundaría en redes más eficientes y más amigables con el medio ambiente.

VIII. REFERENCIAS

- Abhayawardhana, V.S., Wassell, I.J., Crosby, D., Sellars, M.P., & Brown, M.G. (2005). Comparison of empirical propagation path loss models for fixed wireless access systems. *IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, May-Jun. 2005, p.73-77.
- Bresenham, J.E. (1965). Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal*, 4(1), 25-30
- Cavdar, I.H. (2001). A statistical approach to Bertoni-Walfisch propagation model for mobile radio design in urban areas. En *Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Spring. IEEE VTS 53rd* [Vol.1], p.279-283.
- Erceg, V., Hari, K.V.S., Smith, M.S., Baum, D.S., Soma, P., Greenstein, L.J., ... Trinkwon, D. (2003). *Channel models for fixed wireless applications* [Reporte Técnico IEEE 802.16]. Recuperado de http://wirelessman.org/tga/docs/80216a-03_01.pdf
- Hata, M., (1980). Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 29(3), 317-325.
- Navarro, A. & Guevara, D. (2010). Using game engines for wideband channel estimation parameters in Andean cities. En *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 12-16 April 2010, p.1-5.
- Navarro, A. (2008). Cali and Andean Tropical Reference Scenario. En *Minutes of the 4th Cost 2100 Management Committee Meeting* [TD(08) 439], Wroclaw, Poland, February 2008
- Navarro, A., Ardila, C., & Mejía, D. (2009). Some comparison between propagation models in Cost 2100 Cali Reference Scenario. *Sistemas y Telemática, S&T*, 7(13), 33-41. http://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/sistemas_telematica/articulo/view/1005
- Sharma, P., & Singh, R.K. (2010). Comparative Analysis of Propagation Path loss Models with Field Measured Data. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(6), 2008-2013.
- Walfisch, J., & Bertoni, H.L. (1998). A Theoretical Model of UHF. Propagation in Urban Environments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 36(12), 1788-1796.

IX. CURRÍCULOS

Andrés Navarro Cadavid, Ph.D, IEEE Senior Member. Ingeniero Electrónico (1993) y Magister en Gestión de la Tecnología (1999) de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín (Colombia). Doctor Ingeniero en Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia (España, 2003). Actualmente es profesor titular y líder del Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones, i2T, de la Universidad Icesi de Cali (Colombia), y Consejero del Programa Nacional de Electrónica, Telecomunicaciones e Informática [ETI]. Sus áreas de interés incluyen los sistemas inalámbricos, su planificación y optimización, y los modelos de propagación de ondas de radio aplicables a la región Andina.

Carlos Andredy Ardila, Ingeniero de Sistemas (2008), estudiante de la Maestría en Gestión de Informática y Telecomunicaciones y miembro desde 2004 del Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones (i2T) de la universidad Icesi de Cali (Colombia). Ha realizado investigaciones en las áreas de Planeación de redes inalámbricas, Ingeniería de Software y Algoritmos de optimización. Ha sido Consultor y Jefe de Proyecto en el desarrollo de software para dispositivos móviles, sistemas distribuidos, soluciones empresariales, juegos educativos y aplicaciones web. Actualmente es parte del grupo de investigadores del proyecto *Servicio universal en cooperación Colombia-España para sistemas de satélite de televisión (Success-TV)*, cofinanciado por Colciencias.