

MODELO DE PROPAGACIÓN EN LAS CIUDADES DE MÉRIDA (VENEZUELA) Y CÚCUTA (COLOMBIA) PARA REDES WLAN, OPERANDO EN 2.4 GHz, EN AMBIENTES EXTERIORES

Pérez García Nelson¹, Herrera Jorge², Uzcátegui José Rafael¹, Bernardo Peña José³

(Recibido agosto 2011, Aceptado octubre 2011)

¹Grupo de Investigación de Telecomunicaciones, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela

²Universidad de Pamplona, Departamento de Telecomunicaciones, Cúcuta, Colombia

³Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela
perezn@ula.ve

Resumen: A pesar de que en la literatura se reportan numerosos trabajos relacionados con modelos de propagación desarrollados para predicción de cobertura en la banda no licenciada de redes inalámbricas de datos de 2,4 GHz, tanto en ambientes interiores como en ambientes exteriores, ninguno de ellos se refiere a condiciones de propagación (morfología, topografía, propiedades atmosféricas, entre otras) típicas de Venezuela o similares. En este sentido, en el presente artículo se desarrolla un modelo para ambientes exteriores, basado en mediciones realizadas en las ciudades de Mérida (Venezuela) y Cúcuta (Colombia), ciudad ésta con características de propagación similares a algunas ciudades de Venezuela, tal como San Cristóbal. El modelo obtenido presenta un mejor desempeño, en términos del error relativo, que los modelos de la literatura con los que fue comparado.

Palabras clave: Redes Inalámbricas de Datos/ Cobertura/ Ambientes Exteriores/ Modelo de Propagación.

WLAN PROPAGATION MODEL IN MERIDA (VENEZUELA) AND CUCUTA (COLOMBIA) CITIES, OPERATING AT 2.4 GHz IN EXTERIOR ENVIRONMENTS

Abstract: Although in the literature are reported numerous papers related to propagation models developed for coverage prediction in the unlicensed wireless network data of 2.4 GHz, for both indoors and in outdoor environments, none of them refer to the (morphology, topography, atmospheric properties, etc.) typical propagation in Venezuela or the like. In this sense, in this article a model for outdoor environments is developed based on measurements made in the cities of Merida (Venezuela) and Cúcuta (Colombia); this city with propagation characteristics similar to some cities in Venezuela as San Cristobal. The development model predicts the received signal level and presents a better performance, in terms of relative error, when it is compared with some of the literature models.

Keywords: Wireless Data Networks/ Coverage/ Outdoor Environments/ Propagation Model

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, las redes de datos que operan con tecnología inalámbrica en la banda de frecuencias libres de 2,4 GHz han experimentado un amplio desarrollo, originando con ello una gran penetración de este tipo de redes y su utilización en distintas aplicaciones para la trasmisión de datos.

Ello ha motivado al desarrollo de modelos, métodos, técnicas, etc., que permitan, por un lado, mayor precisión en la planificación y dimensionamiento de dichas redes, y por otro lado, el mejor desempeño de las mismas en términos de velocidad de transmisión, coexistencia con otras sistemas inalámbricos de comunicaciones, entre otros.

En el caso específico de la planificación y dimensionamiento de las redes inalámbricas de datos, un importante aspecto es la predicción de su cobertura, para lo cual se requiere de modelos de propagación que contemplen la o las frecuencias de operación de interés. En el caso de ambientes exteriores, estos modelos toman en cuenta la morfología, topología, condiciones atmosféricas, entre otros, propias del o los ambientes para los cuales son desarrollados.

En ese sentido, en la literatura se consiguen un significativo número de modelos de propagación (macrocela o microcela) que pueden ser aplicados para la banda de 2,4 GHz, entre los cuales destacan: Young [1], Lee [2], Longley-Rice [3], Okumura [4], Okumura-

Hata [5], Extendido de Hata o COST-231 Hata [6], Sakagami-Kuboi [7] y Walfisch-Bertoni [8].

Sin embargo, ninguno de los citados modelos, así como otros, han sido desarrollados en base a las condiciones de propagación típicas de Venezuela o regiones similares. Precisamente, en el presente artículo se describe el desarrollo de un modelo de propagación semi-empírico para la banda de 2,4 GHz, desarrollado a partir de un conjunto de medidas realizadas en ambientes exteriores en las ciudades de Mérida (Venezuela) y Cúcuta (Colombia), ciudad ésta con características de propagación similar a varias ciudades de Venezuela, tal como San Cristóbal.

II. DESARROLLO

1. Modelos de propagación en ambientes exteriores

En esta sección se presentan las principales características de algunos de los modelos de propagación para ambientes exteriores encontrados en literatura, que han sido desarrollados, la mayoría de ellos, de forma similar a como se desarrollará el modelo objeto del presente artículo.

A. Modelo de Young

Considera una metrópolis con edificios altos. En este caso, las pérdidas de propagación vienen dadas por [1]:

$$L(\text{dB}) = -G_{\text{eb}} - G_{\text{m}} - 20 \log h_{\text{eb}} - 20 \log h_{\text{m}} + 40 \log d + \beta \quad (1)$$

Donde:

- G_{eb} = Ganancia de la antena de la estación radio base (dBi)
- G_{m} = Ganancia de la antena del móvil (dBi)
- h_{eb} = Altura de la antena de la estación radio base (m)
- h_{m} = Altura de la antena del móvil (m)
- β = Factor de densidad de edificios (25 dB para grandes ciudades)

El modelo en cuestión es válido para frecuencias entre 150 MHz y 3,7 GHz

B. Modelo de Lee

Desarrollado para tierra plana, con bastantes imprecisiones para terreno no plano, es considerado “el modelo de Norteamérica”. Las pérdidas de propagación vienen dadas por [2]:

$$L(\text{dB}) = -10 \log \mu_{\Omega_0} + 10 \gamma \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 10 n \log \left(\frac{f}{f_c} \right) - 10 \log F_{\Lambda} \quad (2)$$

Donde:

- μ_{Ω_0} = potencia medida a 1,6 km del transmisor, dados en la Tabla I
- γ = coeficiente de pérdidas de la potencia con la distancia, dado en la Tabla I
- d = distancia entre el transmisor y el receptor (km)

- d_0 = distancia de referencia = 1,6 km
- n = varía según el entorno y la frecuencia (es dado más adelante)
- f = frecuencia de operación (MHz)
- f_c = Frecuencia de referencia = 900 MHz
- F_{Λ} = Factor de ajuste = $F_{h_{\text{eb}}} F_{h_{\text{m}}} F_{P_T} F_{G_{\text{eb}}} F_{G_{\text{m}}}$
- $F_{h_{\text{eb}}}$ = Factor de ajuste por la altura de la estación base
- $F_{h_{\text{m}}}$ = Factor de ajuste por la altura del móvil
- F_{P_T} = Factor de ajuste por la potencia del transmisor
- $F_{G_{\text{eb}}}$ = Factor de ajuste por la ganancia de la antena de la estación base
- $F_{G_{\text{m}}}$ = Factor de ajuste por la ganancia de la antena del móvil

Tabla I. Parámetros del modelo de Lee

Terreno	μ_{Ω_0}	γ
Espacio libre	-45	2
Área abierta	-49	4,35
Suburbano (Norteamérica)	-61,7	3,84
Urbano (Norteamérica)	-70	3,68
Urbano (Norteamérica)	-64	4,31
Urbano (Japón)	-84	3,05

$$F_{h_{\text{eb}}} = \left[\frac{h_{\text{eb}}(\text{m})}{30,48 \text{ m}} \right]^2 \quad F_{h_{\text{m}}} = \left[\frac{h_{\text{m}}(\text{m})}{3 \text{ m}} \right]^\beta$$

$$F_{P_T} = \left[\frac{P_T(\text{W})}{10 \text{ W}} \right]^2 \quad F_{G_{\text{eb}}} = \left[\frac{G_{\text{eb}}(\text{unidades lineales})}{4 (\text{unidades lineales})} \right]$$

$$F_{G_{\text{m}}} = [G_{\text{m}}(\text{unidades lineales})]$$

$$n = \begin{cases} 2 & \text{para } f_c < 450 \text{ MHz y área suburbana / área abierta} \\ 3 & \text{para } f_c > 450 \text{ MHz y área urbana} \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 2 & \text{para } h_{\text{m}} > 10 \text{ m} \\ 3 & \text{para } h_{\text{m}} < 3 \text{ m} \end{cases}$$

C. Modelo de Longley-Rice

Modelo basado en un algoritmo numérico, que se aplica principalmente a sistemas de comunicación punto a punto, en la banda de frecuencia desde 40 MHz hasta 100 GHz, para todo tipo de terreno. El modelo de Longley-Rice [3] considera la geometría del perfil del terreno y la refractividad de la troposfera. Para la línea de horizonte se utiliza principalmente el modelo de reflexión en tierra plana [4], y las pérdidas por difracción para obstáculos aislados se determinan utilizando el modelo de “filo de cuchillo” [4]. Para las predicciones de tropodifusión se utiliza la teoría de dispersión [9]. Este modelo también se conoce con el nombre de Modelo de Terreno Irregular (ITM = *Irregular Terrain Model*). El modelo requiere de gran cantidad de información, la cual no siempre está disponible, por lo que su utilización no siempre es posible.

D. Modelo de Okumura

Es uno de los modelos más utilizados en la estimación de las condiciones de propagación en áreas urbanas [4]. Es aplicable a frecuencias de operación en el rango de 200 MHz a 2 GHz (normalmente extrapolado hasta 3 GHz). Se basa en el uso de curvas que permiten determinar el valor de la atenuación media (A_{mu}) en función de la frecuencia de operación y la distancia del enlace. Asimismo, incluye factores de corrección por la altura de las antenas transmisora y receptora ($F_{h_{eb}}$ y F_{h_m}), así como por el tipo de ambiente o área (F_{AREA}). De esta manera, la pérdida viene dada por:

$$L(dB) = L_{el}(dB) + A_{mu}(dB) - F_{h_{eb}} - F_{h_m} - F_{AREA} \quad (3)$$

Donde L_{el} es la pérdida en el espacio libre dada por [10]:

$$L_{el}(dB) = 32,44 + 20 \log f(\text{MHz}) + 20 \log d(\text{km}) \quad (4)$$

La atenuación media A_{mu} y el factor de corrección por el tipo de ambiente o área F_{AREA} , se determinan a partir de las Figuras 1 y 2 [4].

Adicionalmente,

$$F_{G_{eb}} = 20 \log \left(\frac{h_{eb}}{200} \right) \quad \text{para } 10 \text{ m} < h_{eb} < 1000 \text{ m}$$

$$F_{h_m} = \begin{cases} 10 \log \left(\frac{h_m}{3} \right) & \text{para } h_m \leq 3 \text{ m} \\ 20 \log \left(\frac{h_m}{3} \right) & \text{para } 3 \text{ m} < h_m < 10 \text{ m} \end{cases}$$

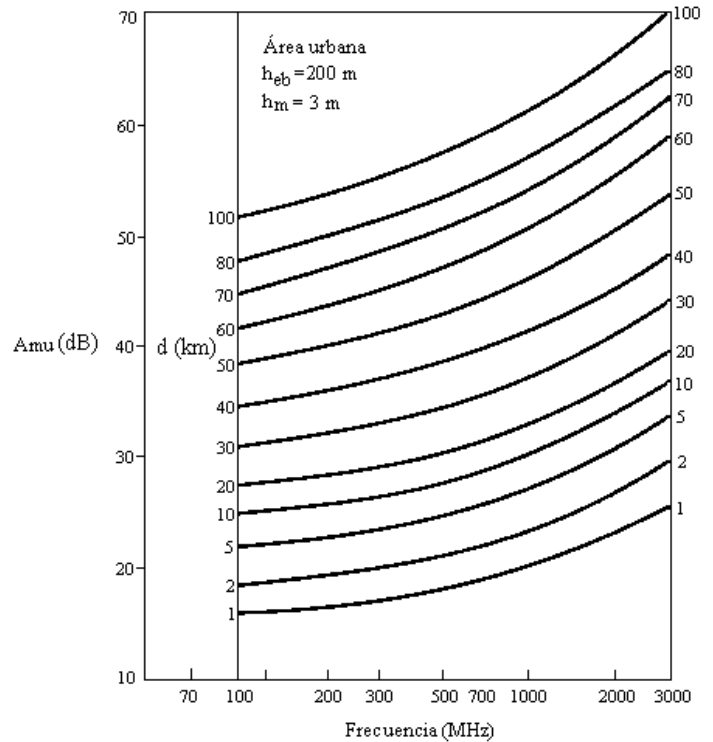


Figura 1. Atenuación media en el modelo de Okumura

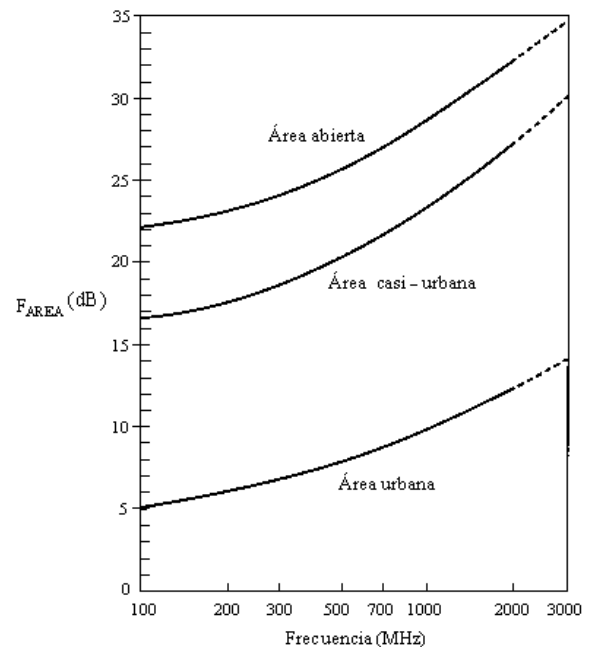


Figura 2. Factor de corrección por tipo de ambiente o área

E. Modelo de Okumura-Hata

Con el propósito de tornar el modelo de Okumura más fácil de aplicar, Hata [5] estableció fórmulas matemáticas empíricas, válidas para el rango de frecuencias de 150 MHz a 1,5 GHz, para describir la información gráfica dada por Okumura. La formulación de Hata es dada por:

Áreas urbanas

$$L_{urbana}(dB) = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log(h_{eb}) - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_{eb}) \log d \quad (5)$$

Donde “d” es válida de 1 km a 20 km, y $a(h_m)$ es un factor de corrección que depende de altura del móvil y la frecuencia, dado por:

$$a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7) h_m - 1,56 \log f - 0,8$$

para ciudades pequeñas o medianas

$$a(h_m) = \begin{cases} 8,29 [\log(1,54 h_m)]^2 - 1,1 & \text{para ciudades grandes y } f \leq 400 \text{ MHz} \\ 3,2 [\log(11,75 h_m)]^2 - 4,97 & \text{para ciudades grandes y } f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases}$$

Áreas suburbanas

$$L(dB) = L_{urbana} - 2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad (6)$$

Áreas rurales o abiertas

$$L(dB) = L_{urbana} - 4,78 (\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94 \quad (7)$$

E. Modelo Extendido de Hata (COST-231 Hata)

Una versión del modelo de Okumura-Hata más utilizada, es la conocida como “Modelo Extendido de Hata” o “Modelo COST- 231 Hata, el cual tiene como principal característica la extensión del rango de frecuencia hasta 2 GHz y la incorporación de un factor de corrección para el tipo de ambiente en la expresión (5). Las pérdidas de propagación son dadas por [6]:

$$L(dB) = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log(h_{eb}) - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_{eb}) \log d + C_M \quad (8)$$

Donde C_M es igual a 0 dB, para ciudades medianas y áreas suburbanas, y 3 dB, para centros metropolitanos. Adicionalmente, el factor $a(h_m)$ se determina con las mismas expresiones empleadas por el modelo de Okumura-Hata.

F. Modelo de Sakagami-Kuboi

Es otra formulación matemática del modelo de Okumura. Las ecuaciones fueron obtenidas mediante el uso de múltiple regresión no lineal a una parte de datos recolectados en Tokio, Japón [7]. Las pérdidas de propagación de este modelo se determinan a partir:

$$L(dB) = 100 - 7,1 \log W + 0,023 \theta + 1,4 \log h_s + 6,1 \log H - \left[24,37 - 3,7 \left(\frac{h}{h_{T_o}} \right)^2 \right] \log h_{eb} + (43,32 - 3,1 \log h_{eb}) \log d + 20 \log f + e^{13(\log f - 3,23)} \quad (9)$$

Donde:

W = Ancho de la calle (entre 5 m y 50 m)

θ = Ángulo del suelo respecto a la dirección del rayo directo (entre 0 e 90°)

h_s = Altura de los edificios a lo largo de la calle (de 5 m a 80 m)

H = Altura media de los edificios (entre 5 y 50 m)

h_{eb} = Altura de la antena de la estación radio base

h_{T_o} = Altura del terreno en la estación en la radio base

El modelo de Sakagami-Kuboi es válido para frecuencias desde 450 MHz has 2,2 GHz, y para distancias entre transmisor y receptor desde 0,5 km hasta 10 km.

G. Modelo Walfisch-Bertoni

Basado en la Teoría Uniforme de Difracción (UTD = *Uniform Theory Diffraction*) [11], este modelo permite estimar las pérdidas de propagación en ambientes urbanos considerando la difracción de la señal en el techo de los edificios. La Figura 3 ilustra la geometría considerada para este modelo. En este modelo, las pérdidas de propagación se determinan a partir de [8]:

$$L(dB) = 89,55 + A + 21 \log f + 38 \log d - 18 \log(h_{eb} - h_{ed}) - 18 \log \left[1 - \frac{d^2}{17(h_{eb} - h_{ed})} \right] \quad (10)$$

Donde el factor A, que incluye la influencia de los edificios, es dado por:

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{w}{2} \right)^2 + (h_{ed} - h_m)^2 \right] - 9 \log w + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2(h_{ed} - h_m)}{w} \right] \right\}$$

Con h_{ed} siendo la altura media de los edificios (en metros) y en “w” la separación entre edificios (en metros).

Por su parte, H es:

$$H = h_{eb} - h_{ed}$$

El rango de frecuencia es válido desde 300 MHz has 3000 MHz, y la distancia entre transmisor y receptor es dada en km.

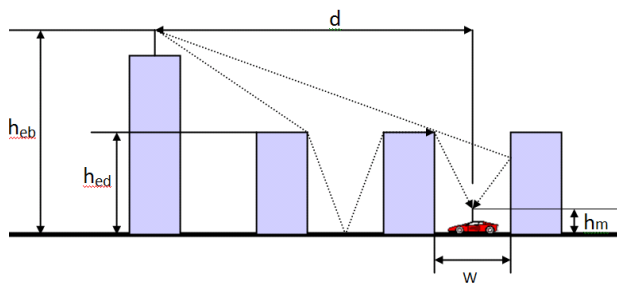


Figura 3. Geometría utilizada en el modelo de Walfisch-Bertoni

2. Set-up experimental

El equipo que se utilizó para las mediciones del nivel de señal recibida consistió en un AP's (Access Point) o Enrutador Inalámbrico haciendo las veces de transmisor; y un computador portátil con tarjeta inalámbrica de red IEEE 802.11a/b/g, fungiendo como receptor.

El transmisor se instaló sobre un mástil a una altura de 3 metros, y fue configurado para irradiar una potencia de 100 mW (20 dBm), en el canal 6 de la banda no licenciada de 2,4 GHz. La ganancia de la antena empleada fue de 5 dBi. A su vez, el receptor se instaló a una altura de aproximadamente un (1) metro, con una ganancia de antena de 0 dBi y una sensibilidad de -98 dBm. Las pérdidas de alimentación en el transmisor y en el receptor se asumen de 1 dB y 0,5 dB, respectivamente.

Las mediciones fueron realizadas cada 5 metros, de acuerdo a la Recomendación ITU-R P.1406 [12], la cual indica que para depurar mediciones con las correspondientes al presente trabajo, es conveniente separar el desvanecimiento rápido (debido a la múltiple trayectoria) del desvanecimiento lento (producto del apantallamiento). Esto se logra, efectuando mediciones “a lo largo de una distancia de unas 40 longitudes de onda”. Se recomiendan al menos “36 medidas en cada distancia, para así obtener un valor medio con una precisión de 1 dB con el 90% de probabilidad”.

Las medidas del nivel de señal recibido fueron tomadas en intervalos de un (1) segundo, durante 60 segundos, en cada punto de medición, durante días diferentes. Para ello se utilizó la herramienta computacional Ethereal [13]. Este procedimiento se repitió para cada uno de los ambientes considerados: urbano, semiurbano y abierto (rural).

3. Entornos y mediciones realizadas

En total, se consideraron siete (7) escenarios, distribuidos de la siguiente manera:

Mérida, Venezuela

- Calle residencial (Urbano-1).
- Patio Central del Núcleo La Hechicera, Universidad de Los Andes (Semiurbano-1).
- Estacionamiento “H” del Núcleo La Liria, Universidad de Los Andes (Semiurbano-2).
- Área semiurbana, con vegetación densa (Semiurbano-3).

Cúcuta, Colombia

- Calle residencial (Urbano-2).
- Área semiurbana, con vegetación densa (Semiurbano-4).
- Área rural, con escasa vegetación (Rural-1).

A modo de ejemplo, las Figuras 4 y 5, muestran la disposición del transmisor (AP) y el receptor (computador portátil), en dos (2) de los escenarios mencionados.

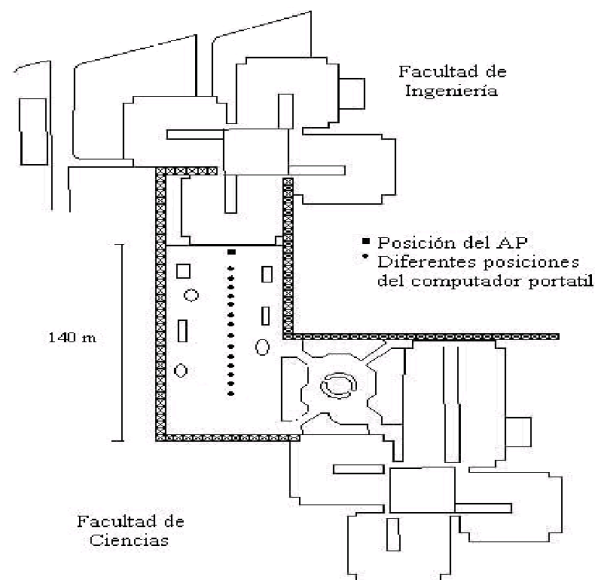


Figura 4. Disposición del AP y del computador portátil, para las mediciones realizadas en el Patio Central del Núcleo La Hechicera, Universidad de Los Andes

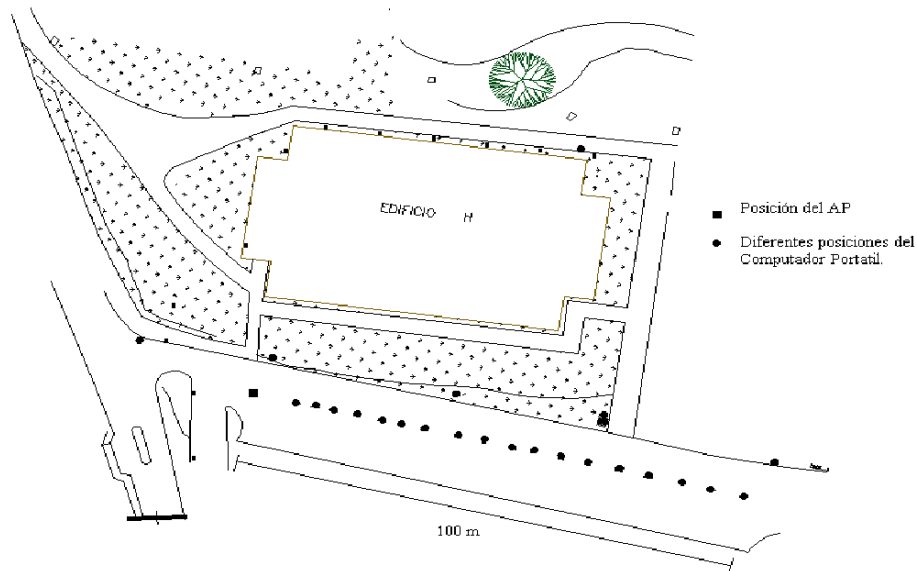


Figura 5. Disposición del AP y del computador portátil, para las mediciones realizadas en el Estacionamiento “H” del Núcleo La Liria, Universidad de Los Andes

En la Figura 6, se muestra el gráfico de dispersión de los valores del nivel de señal recibida en función de la distancia, para los siete (7) escenarios mencionados anteriormente.

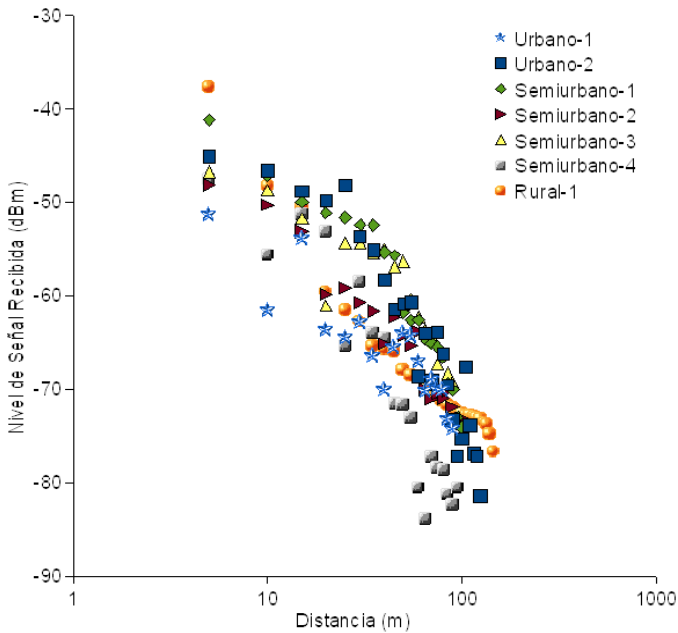


Figura 6. Nivel medido de señal recibida en función de la distancia

Tal como se puede observar en la Figura 6, la tendencia de cada uno de los gráficos de dispersión es el esperado decrecimiento del nivel de señal recibida con el aumento de la distancia entre transmisor y receptor. Y si bien no se puede inferir nada concluyente acerca de las tendencias de los mencionados gráficos en función del ambiente considerado, destaca el hecho de que para el entorno “Rural-1”, como era de esperarse es que se alcanza la mayor distancia de cobertura (145 m), con niveles de potencia recibida superiores a cualquier de los otros entornos que alcanzaron al menos los 100 m de distancia de cobertura (“Urbano-2”, “Semiurbano-1” y “Semiurbano-2”).

4. Desarrollo del nuevo modelo de propagación

A partir de los modelos de propagación existentes en la literatura, anteriormente mencionados, las pérdidas de señal (L) se pueden representar de forma general como sigue:

$$L(\text{dB}) = A + 10 \gamma \log d \quad (11)$$

Donde “A” es un factor que incluye las pérdidas de potencia con la altura del transmisor, múltiples reflexión, obstáculos, entre otros.; y “ γ ” es el ya mencionado el exponente de pérdidas de la potencia con la distancia.

Por ejemplo, en el caso del modelo de pérdidas en espacio libres “ γ ” es igual a 2. Para el modelo de tierra plana “ γ ”

es igual a 4 [4]. En el caso del modelo extendido de Hata, “ γ ” depende de la altura de la estación radio base (h_{eb}).

Ahora bien, dado que las mediciones realizadas se refieren al nivel de potencia recibida y no a las pérdidas de la señal, la expresión (11) es equivalente a la de potencia, cambiando los signos de los dos (2) términos de la misma (los términos que aparecen sumando en una ecuación de pérdidas de potencia, deben aparecer substrayendo en la correspondiente ecuación de potencia recibida). Por tanto, se tiene:

$$P_R \text{ (dBm)} = -A - 10\gamma \log d \quad (12)$$

Donde P_R representa el nivel de señal recibida, “ d ” es dada en metros y los parámetros de “ A ” y “ γ ” se obtienen mediante regresión lineal, utilizando la herramienta computacional de uso libre OpenOffice [14].

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los parámetros de ajuste “ A ” y “ γ ”, para cada uno de los tres (3) ambientes considerados (en el caso de los entornos urbanos y suburbanos, se procedió previamente a determinar el promedio de los niveles de señal recibida para cada una de las distancias de medición para un mismo entorno).

$$P_{R_u} \text{ (dBm)} = -27,51 - 22,59 \log d$$

(para ambientes urbanos) (13.1)

$$P_{R_{su}} \text{ (dBm)} = -26,38 - 21,67 \log d$$

(para ambientes suburbanos) (13.2)

$$P_{R_r} \text{ (dBm)} = -25,63 - 20,75 \log d$$

(para ambientes rurales) (13.3)

Donde:

P_{R_u} = Potencia recibida para ambientes urbanos

$P_{R_{su}}$ = Potencia recibida para ambientes suburbanos

P_{R_r} = Potencia recibida para ambientes rurales

De las expresiones (13.1), (13.2) y (13.3), se deducen los valores estimados de “ γ ” para cada uno de los tres (3) ambientes considerados. Estos valores se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores del parámetro “ γ ”

Terreno	γ
Urbano	2,23
Semiurbano	2,17
Rural	2,08

De la Tabla 2 se concluye, como era de esperarse, que el parámetro “ γ ” disminuye a medida que el entorno tiende a

rural, resultado cónsono con la teoría, en virtud de las menores pérdidas que se espera que hayan en ambientes abiertos. Adicionalmente, comparando el valor de “ γ ” para el ambiente urbano (en realidad, se trata, tal como se mencionó anteriormente, del promedio de las mediciones obtenidas para los dos ambientes urbanos considerados) objeto de las mediciones del presente trabajo, se tiene que el mismo es significativamente menor al que, por ejemplo, se obtiene con el modelo extendido de Hata, el cual típicamente se encuentra en el rango comprendido entre 3 y 4 [15]. Esto se debe a que las mediciones base para el modelo extendido de Hata fueron realizadas en Tokio, Japón, ciudad con una elevada densidad de edificaciones, razón por la cual las pérdidas son mayores a las existentes en los ambientes urbanos de las ciudades de Mérida y Cúcuta.

Ahora bien, con el fin de obtener un modelo general que sea válido para los tres (3) entornos, se considera una dependencia directa de los ambientes semiurbano y rural en relación al ambiente urbano. Esto se hace igualando, de forma genérica, las ecuaciones (13.1) y (13.2), así como las ecuaciones (13.1) y (13.3). De esta forma, se tiene:

$$P_{R_u} \text{ (dBm)} - P_{R_{su}} \text{ (dBm)} = K_1 \text{ (dB)} \quad (14.1)$$

$$P_{R_u} \text{ (dBm)} - P_{R_r} \text{ (dBm)} = K_2 \text{ (dB)} \quad (14.2)$$

Donde:

K_1 = Factor de corrección para ambientes suburbanos

K_2 = Factor de corrección para ambientes rurales

La Tabla 3 muestra los valores de K_1 y K_2 , obtenidos a partir de la media de los resultados, punto a punto, de las expresiones (14.1) y (14.2), respectivamente.

Tabla 3. Valores del K

K_1	-2,28
K_2	0,92

Por tanto, la nueva formulación para la predicción de la potencia recibida del modelo desarrollado en el presente trabajo es:

Ambiente Urbano

$$P_{R_u} \text{ (dBm)} = -27,51 - 22,59 \log d \quad (15.1)$$

Ambiente Suburbano

$$P_{R_{su}} \text{ (dBm)} = P_{R_u} \text{ (dBm)} - K_1 \quad (15.2)$$

Ambiente Rural o Abierto

$$P_{R_r} \text{ (dBm)} = P_{R_u} \text{ (dBm)} - K_2 \quad (15.3)$$

Donde K_1 y K_2 son dados por la Tabla 3.

Las Figuras 7 y 8 muestran la comparación de los valores medidos y estimados (con la formulación inicial y la nueva formulación), para los ambientes suburbano y rural, respectivamente, del nivel de potencia recibido

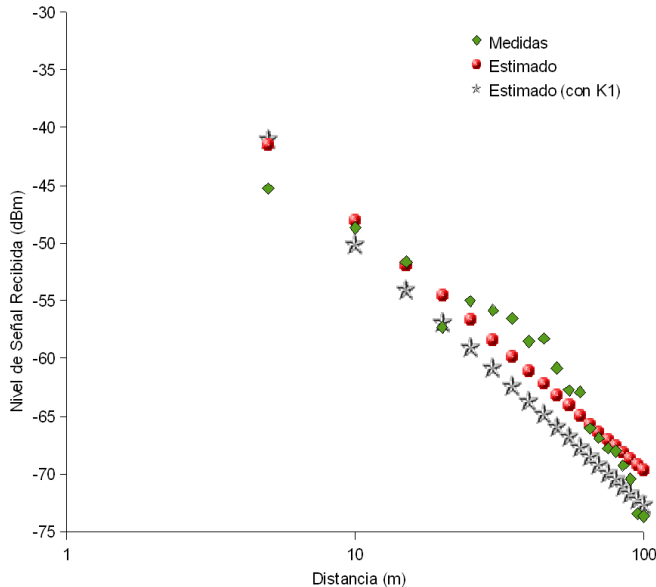


Figura 7. Comparación de los valores estimados, para ambiente suburbano, con las expresiones (13.2) y (15.2)

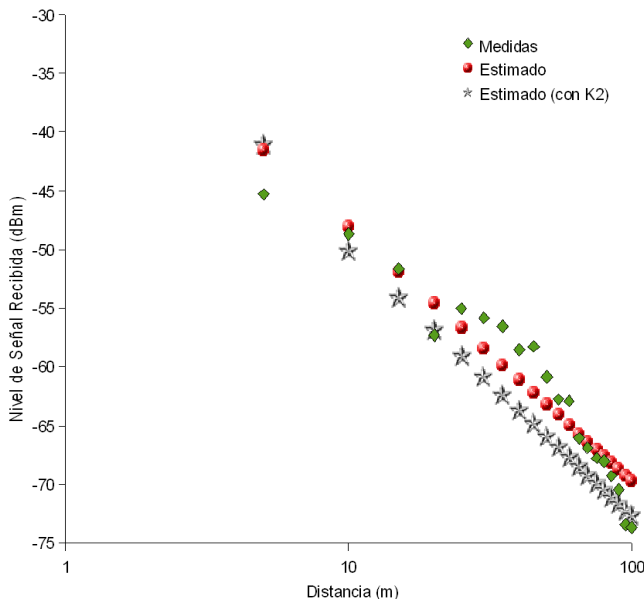


Figura 8. Comparación de los valores estimados, para ambiente rural, con las expresiones (13.3) y (15.3)

En la Figura 7, el error relativo máximo entre los valores estimados por las dos (2) expresiones consideradas es del

-4,26 %; mientras que en la Figura 8, el error relativo máximo es de -5,18%.

A. Expresión Definitiva para la Predicción de Pérdidas de Propagación

Las pérdidas de potencia se determinan a partir de [15]:

$$L(dBm) = P_T(dBm) + G_T(dBi) + G_R(dBi) - L_T(dB) - L_R(dB) - P_R(dBm) \quad (16)$$

Donde:

- P_T = Potencia del transmisor
- G_T = Ganancia de la antena transmisora
- G_R = Ganancia de la antena receptora
- L_T = Pérdidas de alimentación en el transmisor
- L_R = Pérdidas de alimentación en el receptor

Por lo que, a partir de las expresiones (15.1), (15.2), (15.3) y (16), y considerando los parámetros de operación del set-up experimental, se tiene que las pérdidas de propagación de acuerdo al modelo desarrollado en el presente artículo serán dadas por:

Ambiente Urbano

$$L(dB) = 51,01 + 22,59 \log d \quad (16.1)$$

Ambiente Suburbano

$$L(dB) = 51,01 + 22,59 \log d + K_1 \quad (16.2)$$

Ambiente Rural o Abierto

$$L(dB) = 51,01 + 22,59 \log d + K_2 \quad (16.3)$$

Las expresiones (16.1), (16.2) y (16.3), son válidas, preferiblemente, para frecuencia de operación igual a 2,4 GHz, altura de la estación base de 3 m, altura del móvil de 1 m, y distancia entre el transmisor y receptor desde 5 m hasta 150 m.

5. Comparación de resultados

Para evaluar el desempeño del modelo desarrollado, se hace una comparación con los modelos de propagación existentes en la literatura que pueden ser aplicados para las condiciones correspondientes a los entornos donde se realizaron las mediciones objeto del presente artículo. De esta manera, los modelos a ser utilizados para la comparación son el de Young y el COST-231 Hata.

Las Figuras 9a, 9b y 9c, muestran los resultados obtenidos para los ambientes urbano, suburbano y rural, respectivamente. Se observa que el modelo desarrollado presenta un mejor desempeño, en relación a los valores medidos, que los modelos de la literatura considerados para la comparación. En los tres (3) entornos e modelo de Young subestima las pérdidas de propagación. Para el caso del ambiente suburbano, el modelo COST-231-Hata

está más próximo de los valores medidos que en los otros dos ambientes, pero sigue presentando menor desempeño que el del modelo desarrollado.

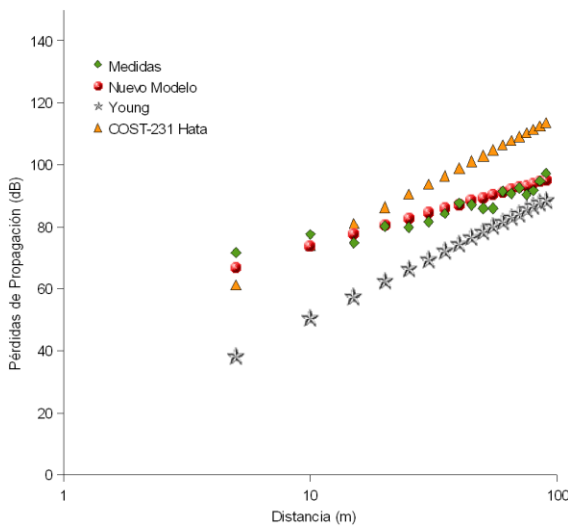
El mejor desempeño del modelo desarrollado se puede comprobar en las Figuras 10a, 10b y 10c, en las se observa que para los tres (3) entornos los error relativos siempre es menor para el modelo en cuestión.

III. CONCLUSIONES

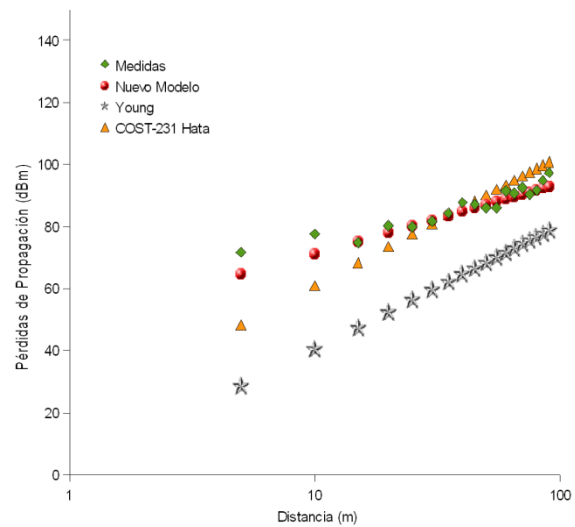
1. Se desarrolló un nuevo modelo de propagación para la estimación de las pérdidas de propagación en una red WLAN operando en 2,4 GHz, ambientes exteriores, en las ciudades de Mérida (Venezuela) y Cúcuta (Colombia). El desarrollo en cuestión se basó en mediciones del nivel de señal recibida realizadas en redes WLAN, operando en la mencionada frecuencia

(2,4 GHz), en tres (3) tipos de ambientes o entornos: urbano, suburbano y rural.

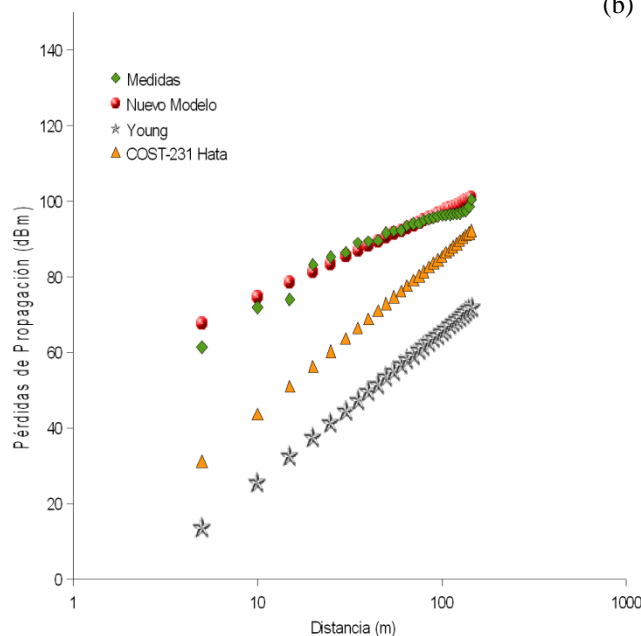
2. El modelo desarrollado consideró como variable independiente la distancia entre transmisor y receptor. No obstante, dado que las mediciones se llevaron a cabo en ambientes diferentes, así como en diversos días y horarios, el modelo en cuestión también consideró la morfología, topología y efectos de las variaciones leves del índice de refracción.
3. Los parámetros de ajuste de las expresiones matemáticas obtenidas para el modelo desarrollado fueron obtenidos utilizando regresión lineal. El desempeño del modelo en cuestión, al ser comparado con algunos de los modelos de propagación para ambientes exteriores existentes en la literatura, específicamente, Young y COST-231 Hata, fue siempre superior, estimando, en algunos casos, con gran precisión las pérdidas de propagación.



(a)



(b)



(c)

Figura 9. Desempeño del modelo desarrollado: a) Ambiente urbano; b) Ambiente suburbano; c) Ambiente rural

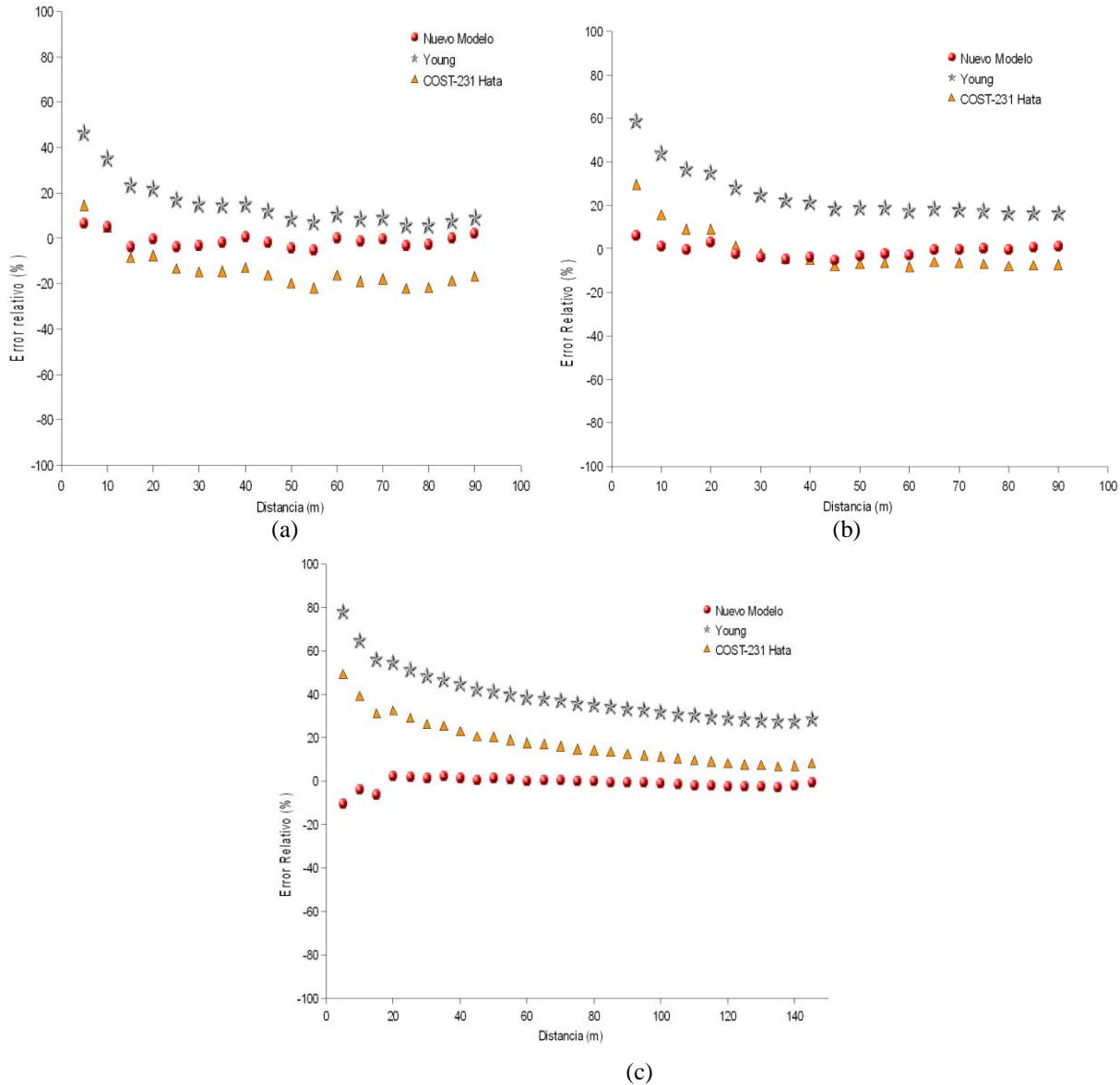


Figura 10. Error relativo: a) Ambiente urbano; b) Ambiente suburbano; c) Ambiente rural

IV. RECOMENDACIONES

1. Realizar mediciones en una mayor cantidad de ambientes exteriores, extendiéndolas a diversos lugares de Venezuela o ciudades de otros países con características de propagación similares, con el fin de que el o los modelos obtenidos tengan una mayor versatilidad en su aplicación en relación a las zonas geográficas del país. Adicionalmente, a medida que

- aumenta el número de medidas, se disminuyen los errores inherentes al proceso de medición como tal.
- 2. Incorporar en las mediciones más bandas de frecuencia, ampliar el rango de la distancia entre transmisor y receptor, y variar las alturas del transmisor y receptor.
- 3. Finalmente, se sugiere emplear equipos de medición de precisión, como por ejemplo, analizador de espectro o medidor de campo. No obstante,

considerando las limitaciones técnicas de rigor que se tienen al utilizar uno o ambos equipos de medición (disponibilidad real de dichos equipos, costo de los mismos, alimentación eléctrica, entre otros), se puede optar por realizar mediciones simultáneas, en algunos entornos, con uno de los equipos sugeridos y un computador portátil (como el empleado en las mediciones objeto del presente artículo), y levantar curvas de calibración que permitan utilizar posteriormente sólo un computador portátil y ajustar los resultados obtenidos según las curvas de calibración.

V. REFERENCIAS

1. Seybold J. "Introduction to RF Propagation". John Wiley & Sons, Inc., New York, 2005.
2. Lee W.C. "Mobile Design Fundamentals", John Wiley, New York, 1993.
3. Longley A.G., Rice P.L. "Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain". ESSA Technical Report ERL 79-ITS 67, Julio 1968.
4. *Yacoub M.D. "Foundations of Mobile Radio Engineering"*. CRC Press, 1993.
5. Hata M. "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services". IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-29, No. 3, pp. 317-325, August 1980
6. COST Telecommunications. "Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems - COST 231 Final Report", Bélgica, 1999.
7. Garg V. K., Wilkes, J. E. Wireless and Personal Communications Systems, Prentice Hall PTR, 1996.
8. Walfisch J., Bertoni H.L. "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 36, No. 12, pp. 1788-1796, December 1988
9. Casciato M.D. "Radiowave Diffraction and Scattering Models For Wireless Channel Simulation". Tesis de Doctorado, University of Michigan, Estados Unidos, 2001.
10. Parsons J.D. "The Mobile Radio Propagation Channel". 2nd Edition, John Wiley & Sons, Londres, Inglaterra, 2000
11. Kouyoumjian R., Prabhakar, P. "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface". Proceedings of the IEEE, Vol. 62, No. 11, pp. 1448-1461, November 1974.
12. Recommendation ITU-R P.1406-1. "Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting services in the VHF and UHF Bands". Ginebra, Suiza, 2007
13. Ethereal (Agosto 2011). "Powerful Multi-Platform Analysis". Disponible en <http://www.ethereal.com/>
14. OpenOffice.org (Agosto 2011). "OpenOffice.org". Disponible en <http://www.openoffice.org/>
15. Pérez García N. "Cálculo de Cobertura de Sistemas WLL e LMDS". Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/Rio), Brasil, Abril 2000.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes (CDCHTA), Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, bajo el proyecto I-967-06-02-A.