



## NUEVO MODELO DE PROPAGACIÓN PARA REDES WLAN OPERANDO EN 2.4 GHz, EN AMBIENTES INTERIORES

(A New Propagation Model for WLAN Operating at 2.4 GHz, in Indoor Environments)

Recibido: 11-07-2010 Aprobado: 21-11-2010

### Nelson Pérez García

Grupo de Investigación en Telecomunicaciones (GITEL) - Mérida, Venezuela  
Correo electrónico: [perezn@ula.ve](mailto:perezn@ula.ve), [nelsonp90@hotmail.com](mailto:nelsonp90@hotmail.com)

### Carolina Pabón Maldonado

Universidad Experimental del Táchira (UNET) - San Cristóbal, Venezuela  
Correo electrónico: [cpabon@unet.edu.ve](mailto:cpabon@unet.edu.ve), [carola.pabonm@gmail.com](mailto:carola.pabonm@gmail.com)

### José Rafael Uzcátegui

Grupo de Investigación en Telecomunicaciones (GITEL) - Mérida, Venezuela  
Correo electrónico: [joseu@ula.ve](mailto:joseu@ula.ve)

### Emigdio Malaver

Grupo de Investigación en Telecomunicaciones (GITEL) - Mérida, Venezuela  
Correo electrónico: [emalaver@ula.ve](mailto:emalaver@ula.ve), [emigdio.malaver@gmail.com](mailto:emigdio.malaver@gmail.com)

## RESUMEN

El gran auge de las redes inalámbricas de datos funcionando en la bandas de frecuencias libres, obliga al desarrollo de modelos de propagación que consideren, de una manera u otra, aquellas características propias del local donde se implementa la red, que influyen en el alcance de cobertura, para poder predecir con la mayor precisión posible, las pérdidas en el nivel de señal, tanto en ambientes exteriores como interiores. En este sentido, este artículo se centra en el desarrollo de un modelo de propagación que permite estimar las pérdidas en una red WLAN (*Wireless Local Area Network*) operando en 2.4 GHz (estándar IEEE 802.11b/g). El abordaje se restringe al caso de ambientes interiores y se basa en una serie de mediciones del nivel de potencia recibido realizadas dentro de las instalaciones de la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), San Cristóbal, Venezuela. El modelo desarrollado presenta un mejor desempeño en la estimación de las pérdidas de propagación que los modelos de la literatura con los que fue comparado.

**Palabras clave:** Redes inalámbricas de datos, ambientes interiores, cobertura, modelo de propagación

## ABSTRACT

The recently increase of wireless data networks operating at unregulated frequencies, demand the development of propagation models to take into account, in a lesser or more detailed manner, all the issues that affect the extent of coverage of the indoor environment in which the networks are deployed; the models allow for a more accurate estimation of



the level of signal loss and can be applied to indoor and outdoor environments. Therefore, this paper focuses on developing a propagation model that allow to estimate the signal loss on a WLAN (Wireless Local Area Network) operating at 2.4 GHz according to the standard IEEE 802.11b/g. The study is restricted to indoor environments applications and is based on a set of measurements of the signal power level obtained inside the buildings of the Universidad Nacional Experimental del Táchira - UNET, San Cristobal, Venezuela. The new model presents a better performance in the estimation of the propagation losses that the models of the literature with whom it was compared.

**Keywords:** Wireless data networks, indoor environments, coverage, propagation model

## INTRODUCCIÓN

El interés por las comunicaciones inalámbricas de datos, tanto en ambientes interiores como exteriores, ha crecido vertiginosamente en los últimos años debido a sus numerosas ventajas en relación a las redes cableadas: menor tiempo de instalación, flexibilidad, escalabilidad, portabilidad, entre otras (Serrano, 2008 y Roldán, 2004).

En el caso específico de ambientes interiores, la radiopropagación afecta de manera directa las señales que se difunden, debido a los fenómenos de reflexión, difracción, absorpci n y dispersión, impactando significativamente en la cobertura y desempeño de las redes (Pabón, 2010). Adicionalmente, se debe considerar la topología de las edificaciones y la composición de los materiales de construcción utilizados. Estos aspectos suelen ser considerados, de alguna u otra forma, en los diversos tipos de modelos de propagación utilizados para predecir, por ejemplo, la cobertura: modelos empíricos basados en "ensayo y error"; modelos analíticos basados en la propagación de ondas electromagnéticas y modelos semi-empíricos basados en ajustes de expresiones matemáticas a un conjunto de mediciones.

En la literatura existente se puede conseguir un importante número de modelos de propagación para ambientes interiores (Rappaport, 2004; ITU, 2009; Parsons, 2000; Saunders et al., 2007; Hamzah et al., 2006; Cheung et al., 1998; Tarng & Liu, 1999; Li et al., 2005; Bento & Fabris, 2010; Hassan-Mi & Pahlavan, 1998; Saleh & Valenzuela, 1987; Commision of the European Communities and Cost Telecommunications, 1999), pero ninguno de ellos ha sido desarrollado para características propias de locales t picos en Venezuela, donde el abordaje ha sido muy incipiente en lo que la estimación de la cobertura para el mencionado tipo de ambiente se refiere.

Por tal razón, se requiere desarrollar modelos que permitan estimar con la mayor precisión posible, la cobertura de las redes WLAN's, con base en las características de propagación de los locales donde las mismas se implementan. En el caso específico del presente artículo, el trabajo se consiste en una serie de mediciones de campo del nivel de señal recibida, en la banda de frecuencia 2,4 GHz (no licenciada), en ambientes interiores de la Universidad Experimental de Táchira (UNET), localizada en la ciudad de San Cristóbal, Venezuela. Los parámetros considerados en el desarrollo del modelo en cuestión fueron: la distancia transmisor-receptor, altura del transmisor, características de los edificios donde se instalaron los transmisores (material de pisos, paredes y techos),



atenuación de la señal por obstrucción cuando se atraviesa un piso y atenuación de la señal por obstrucción cuando se atraviesa las paredes (hasta seis).

## MODELOS DE PROPAGACIÓN EN AMBIENTES INTERIORES

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

### A. Modelo *Log-Distance*

En este modelo (Rappaport, 2004), el promedio del nivel de señal recibido disminuye con el logaritmo de la distancia transmisor-receptor, independientemente de si se trata de ambientes interiores o exteriores. Para ambientes interiores el promedio de la pérdida de potencia para una separación arbitraria entre transmisor y receptor se expresa como una función de la distancia utilizando un exponente de pérdidas  $\gamma$  (depende del entorno y del tipo de edificaciones), a través de la expresión:

$$L(\text{dB}) = L(d_0) + 10 \gamma \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (1)$$

Donde:

$L(d_0)$ : Pérdidas de propagación a una distancia  $d_0$ , en dB (calculadas utilizando el modelo de pérdidas en el espacio libre, o a través de mediciones de campo realizadas a dicha distancia)

$d_0$ : Distancia de referencia, en km (para ambientes interiores, generalmente igual a 0,01 km o 0,001 km).

$d$ : Distancia entre transmisor y receptor.

$X_\sigma$ : Variable aleatoria (normal o gaussiana), en dB, con media igual a cero y desviación estándar  $\sigma$ , también en dB. Este parámetro refleja la atenuación causada por el desvanecimiento plano (en el caso de que no haya desvanecimiento,  $X_\sigma$  es igual a cero).

En Rappaport (2004), se reportan valores medidos de  $\gamma$  y  $\sigma$  para diferentes tipos de ambientes interiores.

Por su parte, las pérdidas de propagación en el modelo de espacio libre,  $L_{el}$ , vienen dadas por Parsons (2000):



$$L_{e1}(\text{dB}) = 92,44 + 20 \log f(\text{GHz}) + 20 \log d(\text{km}) \quad (2)$$

Donde “f” es la frecuencia de operación.

### B. Modelo de Propagación de ITU-R para Ambientes Interiores

Este modelo fue desarrollado por la ITU-R (ITU, 2009) para predecir la atenuación de la señales en el rango comprendido entre 900 MHz y 100 GHz, en ambientes interiores. Este modelo considera los siguientes efectos de propagación (Joshi & Pérez, 2006):

- Reflexión y difracción en objetos fijos.
- Refracción a través de paredes, pisos y otros obstáculos fijos.
- Confinamiento de la energía en pasillos.
- Presencia de personas y objetos en movimiento en el ambiente.

La pérdida de propagación es determinada por:

$$L(\text{dB}) = 20 \log f + 10 \gamma \log d + L_f N_f - 28 \quad (3)$$

Donde “f” está dada en MHz,  $L_f$  es el coeficiente de atenuación por pisos atravesados (en dB) y  $N_f$  es el número de pisos atravesados.

La expresión (3) es válida para  $d > 1 \text{ m}$  y  $N_f \geq 1$

Los valores de  $\gamma$  y  $L_f$  son dados por la ITU-R para ambientes residenciales, de oficina y comerciales, y hasta para siete (7) bandas de frecuencia diferentes (ITU, 2009)

### C. Modelo COST 231 Keenan y Motley

Desarrollado exclusivamente para propagación en ambientes interiores, es un modelo empírico que considera la pérdida en el espacio libre en conjunto con la pérdida adicional que se produce cuando la señal directa entre transmisor y receptor atraviesa diferentes paredes y pisos. Su aplicación requiere conocer un gran volumen de datos, y la atenuación de la señal se determina a través de:

$$L(\text{dB}) = L_0 + 10\gamma \log d + \sum_{i=1}^I N_{f,i} L_{f,i} + \sum_{j=1}^J N_{w,j} L_{w,j} \quad (4)$$

Donde:

$L_0$ : Pérdidas de propagación a un (1) metro de la antena transmisora, en dB



$L_{f,i}$ : P  rdidas de propagaci  n de la se  al a trav  s de los pisos, en dB

$N_{f,i}$ : N  mero de pisos con las mismas caracter  sticas

$L_{w,j}$ : P  rdidas de propagaci  n de la se  al a trav  s de paredes, en dB

$N_{w,j}$ : N  mero de paredes con las mismas caracter  sticas.

I: N  mero de tipos de pisos atravesados por la se  al

J: N  mero de tipos de paredes atravesadas por la se  al

En caso de no contar con la informaci  n suficiente sobre los tipos de paredes y pisos, se aplica versi  n simplificada del modelo, con un   nico tipo de piso y dos (2) tipos de paredes:

$$L(\text{dB}) = 37 + 20 \log d + N_f L_f + \sum_{j=1}^2 N_{w,j} L_{w,j} \quad (5)$$

Donde:

$N_f$ : N  mero de pisos atravesados

$L_f$ : P  rdidas a trav  s de los pisos, en dB

$L_{w,1}$ : P  rdidas en paredes ligeras de madera, puertas, etc, en dB

$L_{w,2}$ : P  rdidas en paredes gruesas, tabiques de ladrillo, cemento, etc, en dB

En la Tabla 1 aparecen los valores t  picos de las mencionadas p  rdidas:

**Tabla 1. Factores de p  rdida de acuerdo al tipo de paredes**

Tipo de p��rdida	Rango de atenuaci��n (dB)
$L_f$	13 – 27
$L_{w1}$	2 – 4
$L_{w2}$	8 – 12

#### D. Modelo COST 231 Multi-Wall:

El COST 231 *Multi-wall* (MWM = *Multi-wall model*) se basa en el modelo de propagaci  n COST 231 Keenan y Motley, adicionando una componente de p  rdida lineal proporcional al n  mero de paredes atravesadas, as   como un t  rmino m  s complejo que depende del n  mero de pisos atravesados que arroja una p  rdida que aumenta m  s lentamente para pisos adicionales despu  s del primer piso atravesado. La atenuaci  n total viene dada por (Saunders et al., 2007):



$$L(\text{dB}) = L_o + 10\gamma \log d + L_f N_f \left( \frac{L_f - 2}{L_f + 1} - b \right) + \sum_{j=1}^J N_{w,j} L_{w,j} \quad (6)$$

Donde  $N_f$  es el número de pisos atravesados y "b" es un factor de atenuación asociado a los pisos que la señal debe atravesar.

### EQUIPO UTILIZADO

El equipo utilizado para la realización de las mediciones del nivel de señal recibida consistió en AP's (*Access Point*) o Enrutador Inalámbrico funcionando como transmisor (operando en 2,4 GHz) y un computador portátil con tarjeta inalámbrica de red IEEE 802.11a/b/g, haciendo las veces de receptor.

El registro de las mediciones se llevó a cabo mediante la utilización de la herramienta computacional de "código abierto" Network Stumbler (Metageek, 2010), tomando muestras cada 15 segundos.

#### A. Transmisor

- AP Cisco Aironet 350 Series, velocidad de transmisión hasta 11 Mbps, protocolo IEEE 802.11b, potencia de transmisión hasta 100 mW, alcance hasta 107 metros en ambientes interiores, antena AIR-WGB35xC: dipolar extraible de 2,2 dBi de ganancia.
- Linksys Cisco WRTt54g2, protocolos IEEE 802.11b/g, velocidad de transmisión de 11 Mbps (IEEE 802.11b) hasta 54 Mbps (IEEE 802.11g), potencia de transmisión hasta 100 mW, alcance hasta 100 metros en ambientes interiores, dos (2) antenas internas.

#### B. Receptor

Computador portátil con tarjeta inalámbrica Broadcom, modelo BCM94322AG, protocolos IEEE 802.11a/b/a, velocidad hasta 54 Mbps, seguridad WEP WPA WPA2, potencia de salida de 18 dBm (para 2,4 GHz), compatible con Windows y Linux, dos (2) antenas para transmisión y recepción, simultáneamente.

#### C. Parámetros de Operación

La Tabla 2 muestra los parámetros de operación utilizados en el *set-up* experimental del presente trabajo.

**Tabla 2. Parámetros de operación del set-up experimental**

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión, $P_T$ (dBm)	-10
Ganancia de la antena transmisora, $G_T$ (dBi)	2,2
Ganancia de la antena receptora, $G_T$ (dBi)	0
Pérdidas de alimentación en el transmisor, $L_T$ (dB)	0
Pérdidas de alimentación en el receptor, $L_T$ (dB)	0

## ENTORNOS Y MEDICIONES REALIZADAS

Se consideraron tres (3) escenarios, todos localizados en la Universidad Experimental del Táchira (UNET), San Cristóbal, Venezuela.

### A. Nivel de Señal Recibida en Función de la Distancia

La Figura 1 muestra el plano a escala del primer piso del Edificio A de la UNET. El transmisor (AP) utilizado se colocó en el área de la Estudiantina a una altura de 2,6 m. Se eligieron tres (3) caminos para las mediciones, tal como señala en la mencionada figura. El Camino 1 corresponde al pasillo central, mientras que los Caminos 2 y 3 se establecieron a través de las aulas de clase.

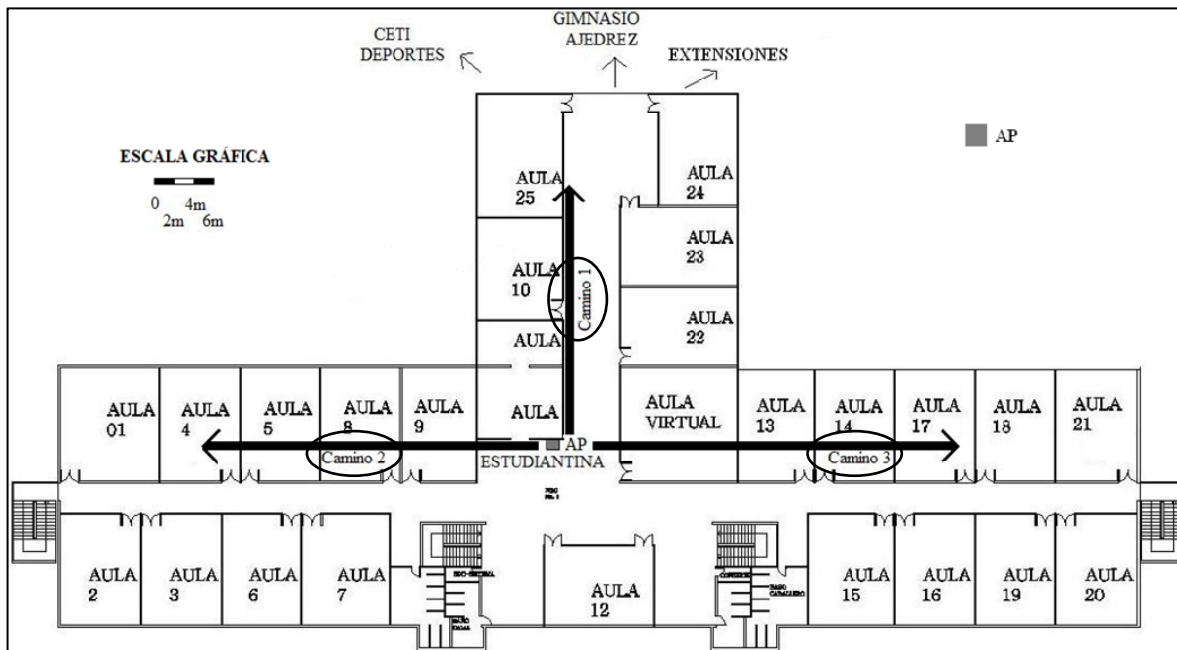


Figura 1. Caminos de medición considerados en el Edificio A de la UNET, primer piso.

Por su parte, la Figura 2 ilustra los caminos de medición 4, 5 y 6, que corresponden a rutas trazadas desde el mismo AP del caso anterior (localizado en la Estudiantina) hasta

puntos localizados en la planta baja del mismo Edificio A de la UNET. De esta manera, se podrá incluir el impacto que tiene el piso sobre el nivel de señal recibida. Los caminos en cuestión son: a) Camino 4: dirigido hacia el pasillo; b) Camino 5: hacia el hall A; c) Camino 6: dirigido hacia las oficinas del Decanato de la UNET.

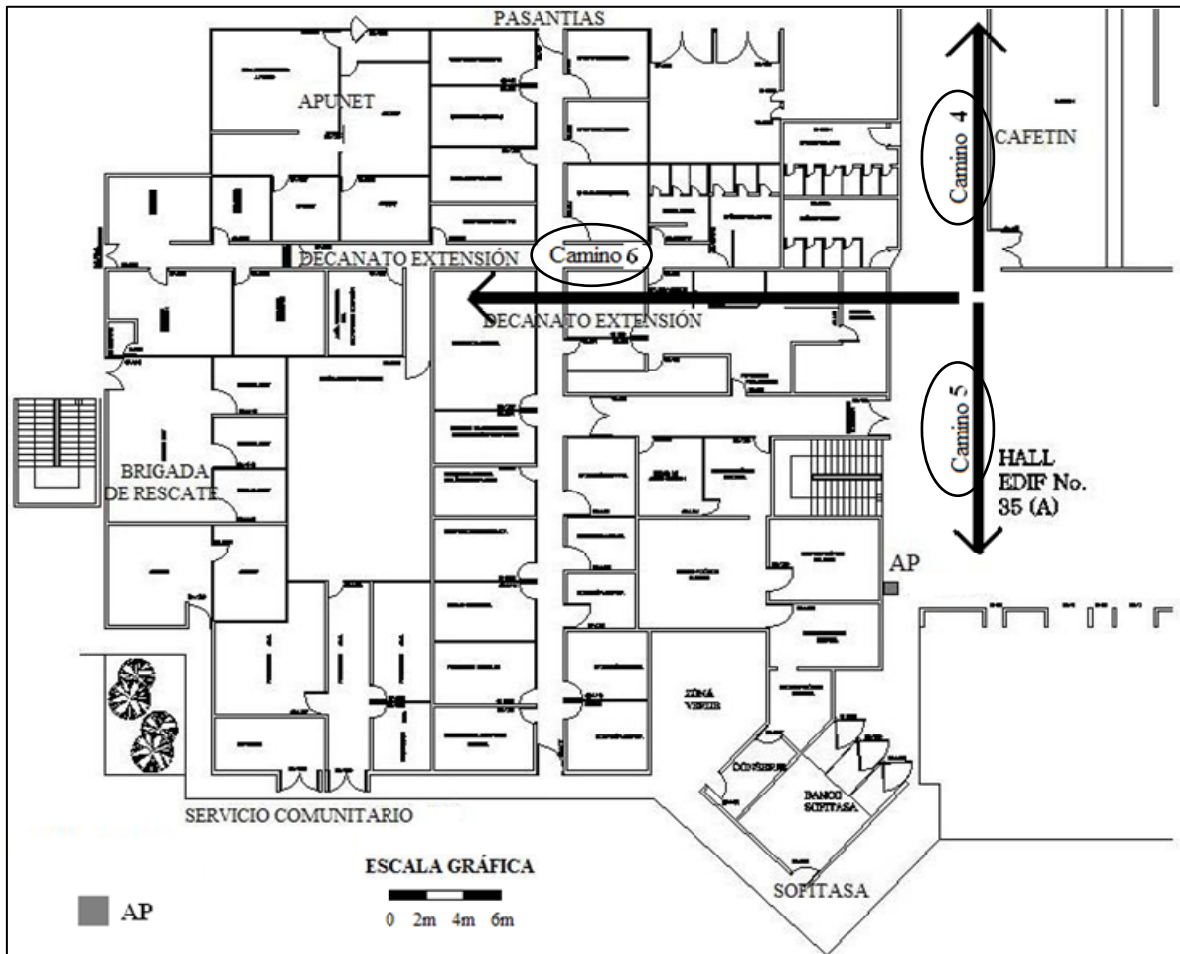


Figura 2. Caminos de medición considerados en el Edificio A de la UNET, planta baja.

Las mediciones en cuestión fueron realizadas con espaciado igual a tres (3) metros entre puntos (comenzando desde el transmisor), y sobre cada camino las mediciones fueron realizadas tres (3) veces en horarios y días diferentes, con el fin de considerar diversas situaciones en cuanto a presencia de personas, etc. Para cada punto de medición el valor final considerado fue el promedio de las tres (3) mediciones mencionadas.

En la Figura 3, se muestra el gráfico de dispersión de los valores del nivel de señal recibida en función de la distancia, para los seis (6) caminos mencionados anteriormente.



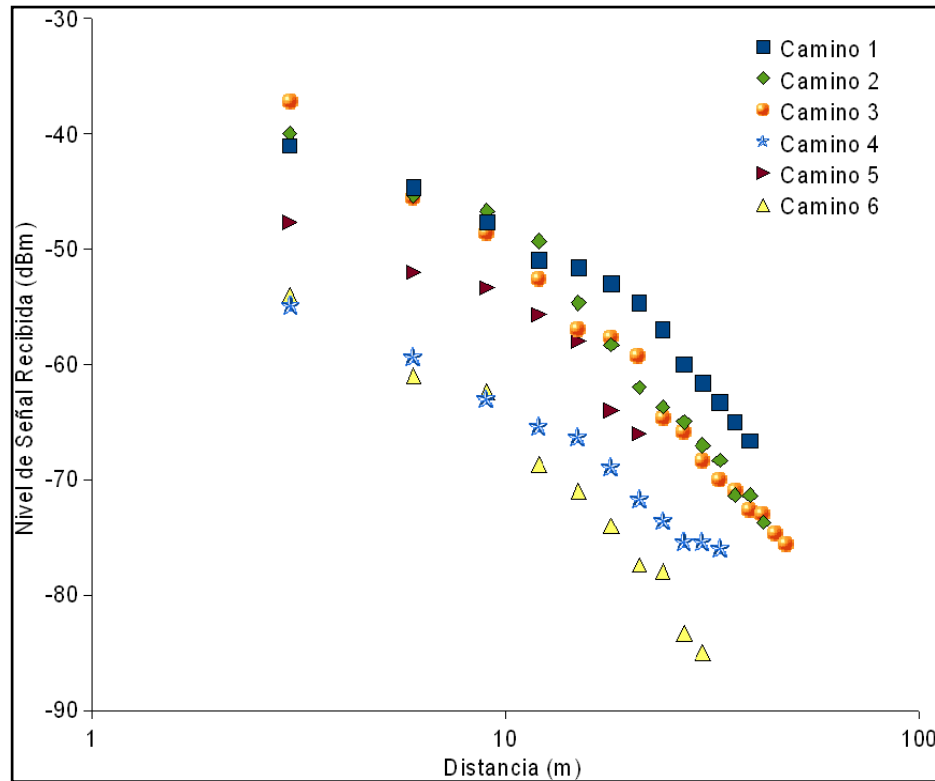


Figura 3. Nivel de señal recibida en función de la distancia, en el primer piso y planta baja del Edificio A de la UNET

Tal como se puede observar en la Figura 3, 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. Además, los Caminos 1, 2 y 3 son los que presentan menores pérdidas con la distancia, debido a que se trata de los tres (3) caminos directos que no atraviesan pisos. Entre ellos, el que tiende a presentar menores pérdidas de propagación es el Camino 1. Esto se debe a que dicho camino no atraviesa paredes (comportamiento similar se observa en el conjunto de Caminos 4, 5 y 6, en el cual el Camino 5 corresponde a un ambiente despejado de paredes y objetos fijos).

Asimismo, la Figura 3 también muestra que el Camino 6 es el que más pérdidas de la señal con la distancia arroja. Ello se fundamenta en el hecho de que el camino en cuestión es el que presenta mayor cantidad de paredes de mayor espesor, gran cantidad de mobiliario y equipos de computación, presentándose, en consecuencia, mayor cantidad de reflexiones y difracciones de la señal propagada.

### B. Nivel de Señal Recibida en Función de la Altura del Transmisor (AP)

En este caso, el AP fue localizado en uno de los extremos del primer piso del Edificio A de la UNET, tal como se ilustra en la Figura 4. Se varió la altura del AP, y se realizaron mediciones (en serie de tres y en horarios y días diferentes) del nivel de señal recibida en un mismo camino, para cada una de las diferentes alturas del AP.

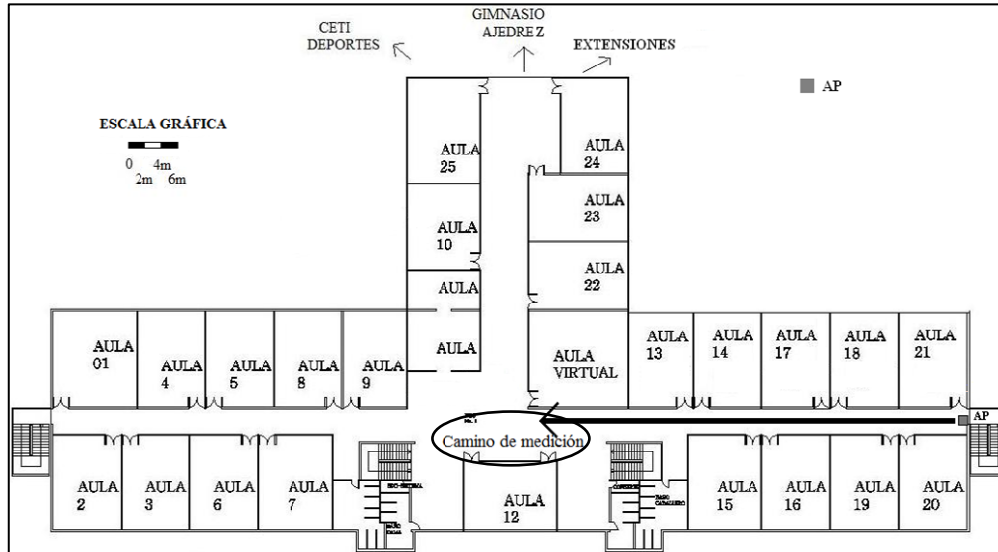


Figura 4. Único camino medición para la evaluación de la variación del nivel de la señal recibida en función de la altura del AP (primer piso del Edificio A de la UNET).

Los resultados de las mediciones realizadas en el caso en cuestión, son mostrados en la Figura 5, donde se observa que a pesar de que el comportamiento general de la pérdida de la señal con la distancia es similar para los cuatro (4) valores de altura de AP seleccionados, la pendiente de inclinación de la tendencia lineal de ajuste de los datos disminuye con el aumento de la altura del AP, lo que significa que las pérdidas de propagación disminuyen al aumentar dicha altura.

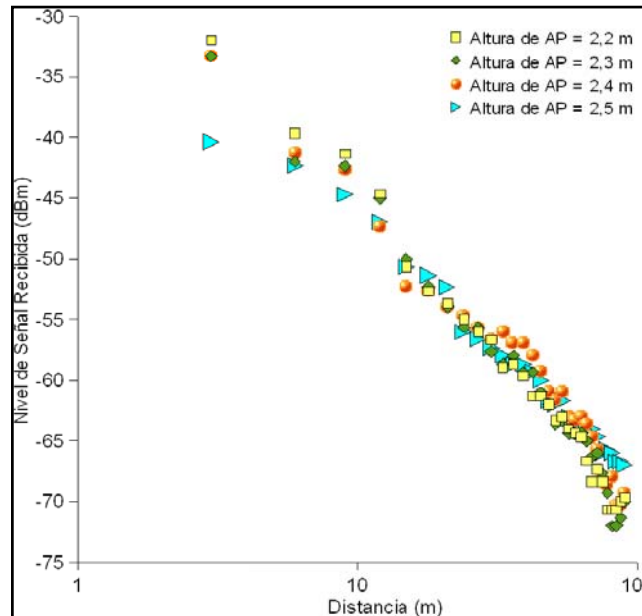


Figura 5. Nivel de señal recibida en función de la distancia, para diferentes alturas del AP (primer piso del Edificio A de la UNET).



## DESARROLLO DEL NUEVO MODELO DE PROPAGACIÓN

Tal como se mencion  anteriormente, la variación del nivel de señal recibida en función de la distancia sigue la tendencia esperada de decrecimiento de dicho nivel con el aumento de la distancia entre transmisor y receptor. Es conocido que en este caso, de forma general, las pérdidas de señal ( $L$ ) son dadas por (Rappaport, 2004):

$$L(\text{dB}) = A + B \log d \quad (7)$$

Donde "A" considera las pérdidas de potencia con la altura del transmisor, paredes, pisos, etc., y B es igual a 10 veces el exponente de pérdidas.

Ahora bien, dado que las mediciones realizadas se refieren a nivel de potencia y no a las pérdidas de la señal, la expresión (7) 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:

$$P_R(\text{dBm}) = -A - B \log d \quad (8)$$

Donde  $P_R$  corresponde al nivel de señal recibida, "d" es dada en metros y los parámetros de "A" y "B" se obtienen mediante regresión lineal, utilizando la herramienta computacional de uso libre OpenOffice (OpenOffice.org, 2010).

Por otra parte, dado que en la expresión (8) no se consideran las constantes de pérdidas por pisos y paredes, se procede a escoger uno de los caminos de medición no afectados por el paso de la señal por pisos o paredes. De los caminos que cumplen con dicha condición se optó por el único camino seleccionado en caso de variación de la altura del AP (ver Figura 4), ya que el mismo corresponde al caso de mayor cantidad de puntos de medición. Los gráficos de dispersión del nivel de señal recibida en función de la distancia para las cuatro (4) alturas consideradas son los mostrados en Figura 5.

Seguidamente, se procede a realizar el ajuste de regresión lineal de cada una de las cuatro (4) tendencias, tal como se observa en las Figura 6a a 6d.

De la Figura 6 se obtiene que la expresión (8) ahora es dada por:

$$P_{R_1}(\text{dBm}) = -17,86 - 26,75 \log d \quad (9.1)$$

$$P_{R_2}(\text{dBm}) = -19,60 - 25,64 \log d \quad (9.3)$$

$$P_{R_3}(\text{dBm}) = -21,51 - 23,85 \log d \quad (9.2)$$

$$P_{R_4}(\text{dBm}) = -27,12 - 20,23 \log d \quad (9.4)$$

Donde los subíndices 1, 2, 3 y 4, corresponden a las alturas del AP iguales a 2,2 m; 2,3 m; 2,4 m y 2,5 m, respectivamente.

De las expresiones (9.1) a (9.4) se observa que el exponente de pérdidas resultante de las mediciones está comprendido entre 2,023 (20,23/10) y 2,675 (26,75/10), similar o mayor al que corresponde al modelo de pérdidas en espacio libre (igual a 2), pero menor a los encontrados para ambientes exteriores (iguales o mayores a 3), como era de esperarse.

Adicionalmente, las expresiones (9.1) a (9.4) indican que a medida que la altura del AP aumenta, el parámetro A de variación del nivel de señal recibida se hace más negativo, mientras que el parámetro B se menos negativo. Por tanto, se concluye que la altura del AP afecta a los dos (2) mencionados parámetros.

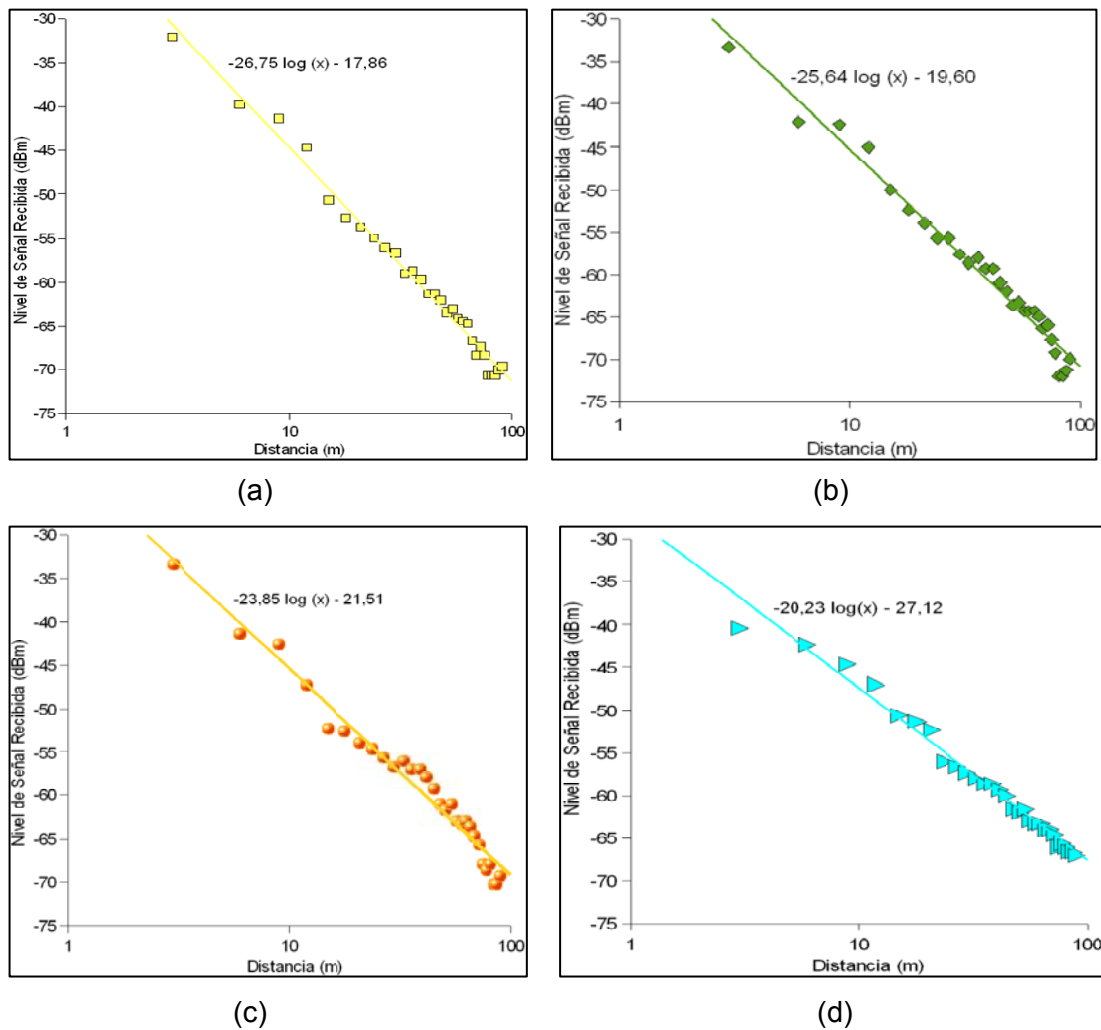


Figura 6. Ajuste de regresión lineal para el caso de variación de la altura del AP: (a) Altura del AP = 2,2 m; (b) Altura del AP = 2,3 m; (c) Altura del AP = 2,4 m; (d) Altura del AP = 2,5 m

Siendo así, de acuerdo con los resultados obtenidos, se propone modificar la expresión general (8), como sigue:

$$P_R \text{ (dBm)} = -(A_1 + A_2h) - (B_1 + B_2h) \log d \quad (10)$$

Donde “h” es la altura del AP dada en metros.

Los ajustes de regresión lineal se llevan a cabo considerando por separado las expresiones ( $A = A_1 + A_2h$ ) y ( $B = B_1 + B_2h$ ), resultando:

$$A = -48,31 + 29,71h \quad (11)$$

$$B = 74,33 - 21,40h \quad (12)$$

Por lo que la expresión general (10) del modelo aquí propuesto, se convierte en:

$$P_R \text{ (dBm)} = 48,31 - 29,71h + (-74,33 + 21,4h) \log d \quad (13)$$

Para la incorporación de las pérdidas de potencia debido al paso de la señal por un (1) piso, se consideran los resultados de las mediciones de los dos (2) caminos paralelos que presentan menor presencia de paredes y objetos fijos. Estos son: Camino 1 (no atraviesa pisos) y Camino 4 (atraviesa un piso). Se determina el promedio de la diferencia del nivel de señal recibida punto a punto, entre ambos caminos, resultando una constante de pérdida por el piso 1,  $L_{f1}$ , igual a 14,94 dB. La figura 7 muestra las mediciones del nivel de señal recibido en función de la distancia, correspondientes a los caminos seleccionados para la determinación de  $L_{f1}$ .

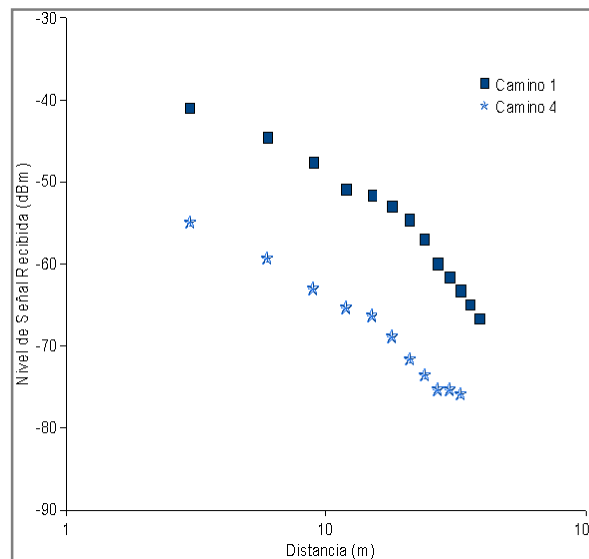


Figura 7. Nivel de señal recibida en función de la distancia (Caminos 1 y 4).



Finalmente, a fin de considerar el efecto de las pérdidas debido a las paredes, se escoge el Camino 3 (primer piso del Edificio A de la UNET), el cual corresponde al caso en que la señal atraviesa la mayor cantidad de paredes (seis en total); y se procede de forma similar al caso de pérdidas de la señal debida a un (1) piso.

No obstante, como en esta oportunidad no se cuenta con un conjunto de mediciones como referencia (mismo camino, pero sin presencia de paredes), se utilizará como referencia el conjunto de valores que se estimen mediante la aplicación de la expresión (13), válida para la situación de no existencia de pisos y paredes, con la altura del AP correspondiente al mencionado Camino 3, es decir, 2,6 m. Por tanto:

$$P_R (\text{dBm}) = 48,31 - 29,71 \times 2,6 + (-74,33 + 21,40 \times 2,6) \log d \Rightarrow \\ \Rightarrow P_R (\text{dBm}) = -28,94 - 18,70 \log d \quad (14)$$

Las respectivas constantes de pérdidas por pared (desde la 1 hasta la 6), se obtienen promediando la diferencia resultante entre los niveles de señal recibida medidos y estimados, para cada una de las distancias involucradas para cada pared atravesada. En la Tabla 3 se resumen las constantes de pérdidas por pared,  $L_w$ , obtenidas para cada grupo de paredes atravesadas.

**Tabla 3. Constante de pérdidas por número de paredes atravesadas**

$N_w$	$L_w$
1	2,46
2	5,56
3	9,66
4	12,27
5	13,42
6	14,92

De la Tabla 2 se observa que a medida que aumenta el número de paredes atravesadas por la señal, la pérdida de propagación comienza a estabilizarse. Esto significa que las primeras paredes son las que tienen un mayor efecto en la atenuación de la señal.

La expresión definitiva del modelo de propagación para la predicción del nivel de señal recibida es:

$$P_R (\text{dBm}) = 48,31 - 29,71 h + (-74,33 + 21,40 h) \log d - L_{f1} - L_{w,i} \quad (15)$$

Ahora bien, las pérdidas de potencia se determinan a partir de (Pérez, 2000):

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



Por lo que, a partir de las expresiones (15) y (16) y considerando los parámetros de operación del set-up experimental (ver Tabla 2), se tiene que las pérdidas de propagación de acuerdo al modelo desarrollado en el presente artículo serán dadas por:

$$L(\text{dB}) = -56,11 + 29,71h + (74,33 - 21,40h) \log d + L_{f_1} + L_{w,i} \quad (17)$$

La expresión (17) es válida para frecuencia de operación igual a 2,4 GHz, un solo piso, hasta seis (6) paredes y altura del transmisor no superior a 3 m (recomendable).

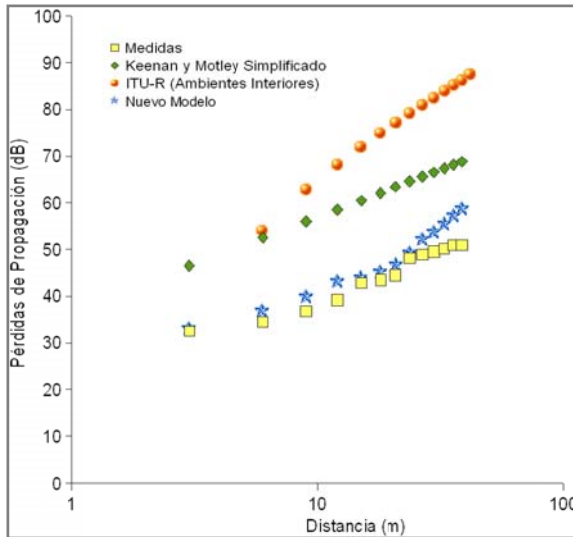
### COMPARACIÓN DE RESULTADOS

El desempeño del modelo desarrollado, cuando no existen pisos ni paredes siendo atravesados por la señal, se compara con los modelos de propagación existentes en la literatura que puedan ser aplicados para las condiciones correspondientes al Edificio A de la UNET. De esta manera los modelos a ser utilizados para la comparación son COST 231 Keenan y Motley (versión simplificada) e ITU-R (para ambientes interiores, considerando un exponente de pérdidas  $\gamma$  igual a 3, que es el correspondiente a la frecuencia más cercana a la utilizada en el presente trabajo).

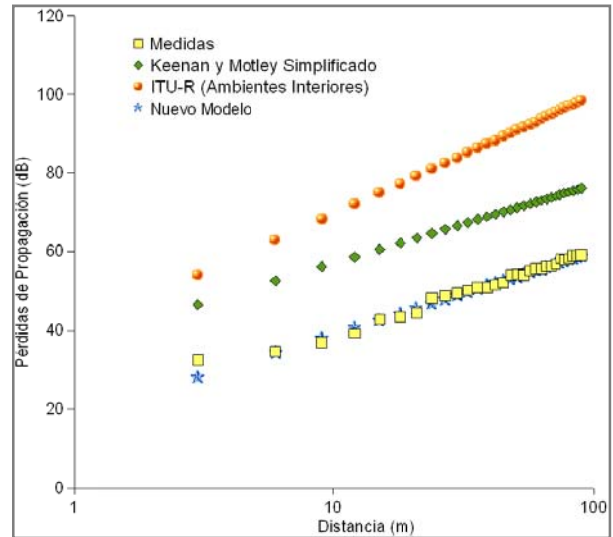
A modo de ejemplo, en las Figuras 8a y 8b, se muestran los resultados obtenidos para dos (2) de los caminos de medición en los que la señal no atraviesa paredes ni pisos. Se trata del Camino 1 y del único camino utilizado cuando se evaluó el impacto de la altura del AP. En ambos casos, se puede observar que el nuevo modelo desarrollado es el que mejor se ajusta a los valores medidos, siendo el modelo de la ITU-R (ambientes interiores) el que más bajo desempeño presenta. Esta afirmación se puede evidenciar de forma cuantificada en las Tabla 4 y 5, en la cual se resumen los errores relativos de cada modelo considerado, en relación a los valores medidos, para ambos caminos.

Para la evaluación del desempeño del modelo propuesto ante la existencia de un piso siendo atravesado por la señal, se consideran los resultados de las mediciones correspondientes al Camino 4, así como los modelos COST 231 Keenan y Motley (versión simplificada, y con factor de pérdida por un piso atravesado igual a 20 dB) e ITU-R (para ambientes interiores, con factor de pérdida igual a 15 dB, que es el correspondiente al rango de frecuencia más cercano a 2,4 GHz).

La Figura 9 muestra los resultados obtenidos, evidenciándose nuevamente el mejor comportamiento para el nuevo modelo desarrollado, y el peor desempeño para el modelo de ITU-R (ambientes interiores). La Tabla 6 muestra los errores relativos de los modelos considerados, en función de los valores medidos, para el Camino 4.



(a)



(b)

Figura 8. Desempeño del modelo desarrollado (Edificio A de la UNET), sin pérdidas en pisos y paredes: (a) Camino 1 (altura del AP = 2,6 m); (b) Único camino (altura del AP = 2,5 m)

Tabla 4. Errores relativos (en porcentaje) de los modelos considerados, en relación a los valores medidos, Camino 1 (altura del AP = 2,6 m)

d(m)	Keenan y Motley Modificado	ITU-R (Ambientes Interiores)	Nuevo Modelo
3	43,06	65,73	2,05
6	52,21	82,28	6,76
9	52,13	85,08	8,14
12	49,45	83,62	10,2
15	41,19	74,7	2,33
18	42,66	77,48	3,83
21	42,46	78	5,24
24	34,03	68,07	2,07
27	34,3	68,92	6,82
30	34,34	69,42	8,75
33	34,2	69,64	10,62
36	33,93	69,65	12,45
39	35,3	71,7	15,73





Tabla 5. Errores relativos (en porcentaje) de los modelos considerados, en relación a los valores medidos, único camino (altura del AP = 2,5 m)

d(m)	Keenan y Motley Modificado	ITU-R (Ambientes Interiores)	Nuevo Modelo
3	43,06	65,73	-13,62
6	52,21	82,28	-0,46
9	52,13	85,08	3,19
12	49,45	83,62	3,68
15	41,19	74,7	-0,48
18	42,66	77,48	1,79
21	42,46	78	2,64
24	34,03	68,07	-2,67
27	34,3	68,92	-1,81
30	34,34	69,42	-1,21
33	34,2	69,64	-0,81
36	33,93	69,65	-0,56
39	35,3	71,7	0,87
42	34,8	71,35	0,86
45	34,22	70,88	0,77
48	31,11	67,16	-1,26
51	31,28	67,59	-0,86
54	33,01	70,01	0,71
57	30,65	67,17	-0,83
60	30,67	67,37	-0,59
63	31,43	68,52	0,2
66	30,59	67,6	-0,24
69	31,28	68,63	0,48
72	30,39	67,63	-0,02
75	28,01	64,7	-1,68
78	29,34	66,53	-0,5
81	29,16	66,42	-0,48
84	28,23	65,34	-1,05
87	28,75	66,12	-0,51
90	28,52	65,93	-0,55

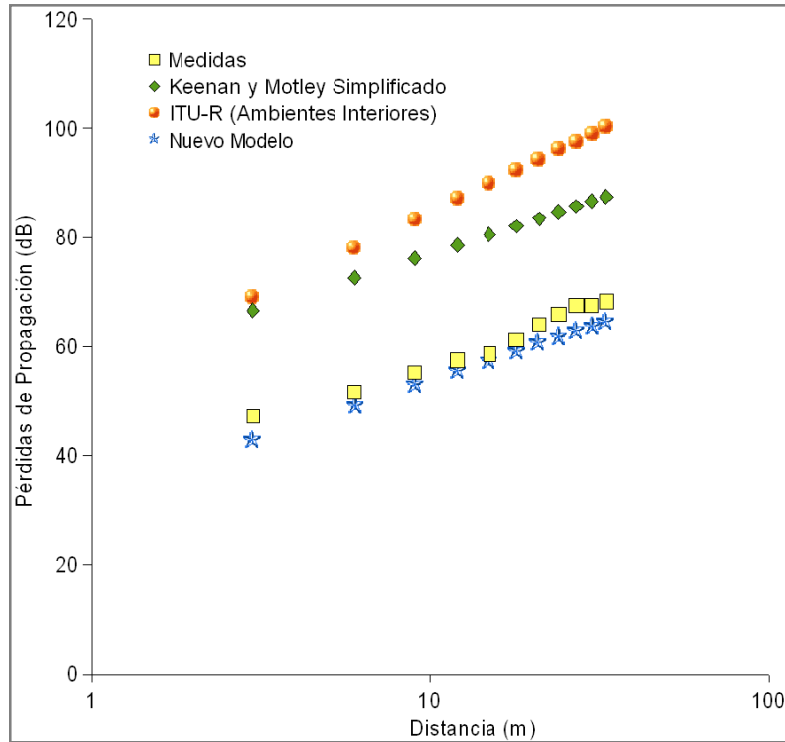


Figura 9. Desempeño del modelo desarrollado (Edificio A de la UNET), con pérdidas en un (1) piso (Camino 4, altura del AP = 2,6 m),

Tabla 6. Errores relativos (en porcentaje) de los modelos considerados, en relación a los valores medidos, Camino 4 (altura del AP = 2,6 m)

d(m)	Keenan y Motley Modificado	ITU-R (Ambientes Interiores)	Nuevo Modelo
3	40,98	46,01	-8,81
6	40,81	51,26	-4,31
9	37,83	50,78	-4,02
12	36,59	51,18	-3,39
15	37,57	53,57	-1,59
18	34,16	50,76	-3,18
21	30,65	47,61	-5,04
24	28,45	45,77	-6,09
27	26,79	44,44	-6,83
30	28,15	46,47	-5,42
33	28,11	46,86	-5,08

Finalmente, para la comparación en caso de pérdidas en paredes, sólo se utiliza el modelo COST-231 Keenan y Motley (versión simplificada), ya que los restantes revisados no toman en cuenta la atenuación en paredes. El modelo de Keenan y Motley propone una atenuación por pared entre 8-12 dB. Como las paredes de las aulas son de cemento, se escoge un factor de atenuación de 10 dB/pared. Las mediciones a considerar son las que corresponden al Camino 3.

Los resultados obtenidos para una (1) y seis (6) paredes, se ilustran en las Figuras 10.a y 10.b, respectivamente, donde se puede observar que a medida que aumento el número de paredes atravesadas por la señal, el modelo nuevo desarrollado mejora su desempeño en la predicción de la estimación de las pérdidas por propagación. Por su parte, el modelo COST-231 Keenan y Motley (versión simplificada) mantiene su bajo desempeño con el aumento del número de paredes atravesadas.

Las Tablas 7 y 8, resumen los errores relativos de los modelos considerados, en relación a los valores medidos, para el Camino 3 y los casos de una (1) y seis (6) paredes, respectivamente.

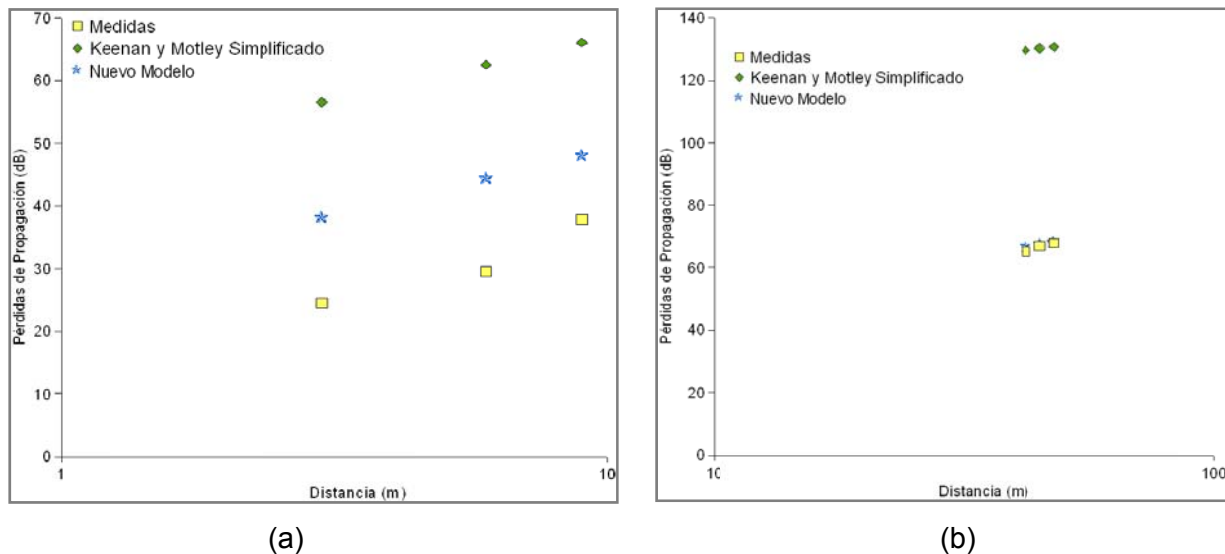


Figura 10. Comparación del desempeño del modelo propuesto con el modelo simplificado de Keenan y Motley (Camino 3; altura del AP de 2,6 m; Edificio A): a) Una (1) pared; b) Seis (6) paredes

Tabla 7. Errores relativos (en porcentaje) de los modelos considerados, en relación a los valores medidos, Camino 3 (altura del AP = 2,6 m), una (1) pared

d(m)	Keenan y Motley Modificado	Nuevo Modelo
3	130,47	55,31
6	111,84	50,25
9	74,52	26,87



Tabla 8. Errores relativos (en porcentaje) de los modelos considerados, en relación a los valores medidos, Camino 3 (altura del AP = 2,6 m), seis (6) paredes

d(m)	Keenan y Motley Modificado	Nuevo Modelo
3	98,57	2,6
6	94,51	0,98
9	92,47	0,35

## CONCLUSIONES

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 interiores. Este desarrollo se basó en medidas del nivel de señal recibida realizadas en una red como la citada, operando en la mencionada frecuencia de operación (2,4 GHz), en ambientes cerrados de una localidad de Venezuela (específicamente, el Edificio A, de la UNET, localizada en la ciudad de San Cristóbal).

El modelo en cuestión contempl  en su formulación la distancia entre transmisor y receptor, la altura del transmisor y la atenuación adicional producida por paredes (hasta 6) y pisos (uno sólo). Asimismo, dado que las mediciones sobre un mismo camino fueron realizadas en series de tres (3), en diferentes días y horarios, de forma implícita también fue considerado, en el desarrollo del modelo, los efectos de las variaciones leves del índice de refracción y de la presencia de personas en el ambiente de operación de la red.

Los parámetros de ajuste de la formulación del modelo desarrollado fueron obtenidos mediante regresión lineal, y el desempeño del mismo, cuando comparados con algunos de los modelos de propagación para ambientes interiores existentes en la literatura, específicamente, COST-231 Keenan y Motley y Recomendación P.1238-6, fue siempre superior, estimando, en algunos casos, con gran precisión los valores del nivel de señal recibido.

## RECOMENDACIONES

Emplear equipos de medición de precisión, tal como un analizador de espectro o medidor de campo. Ahora bien, dadas las limitaciones técnicas de rigor que se tienen al utilizar uno o ambos equipos de medición (disponibilidad real de dichos equipos, alimentación eléctrica, entre otros), se puede optar por hacer mediciones simultáneas, en algunos caminos, 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.

Llevar a cabo más mediciones, que consideren una mayor diversidad de ambientes interiores en términos de tipo de infraestructura de edificaciones, variedad de objetos fijos, etc. Asimismo, desplegar las mediciones en varias ciudades de Venezuela.



Realizar mediciones que tomen en cuenta una mayor cantidad de pisos y paredes siendo atravesados por la señal.

Desplegar mediciones en otras bandas de frecuencia, de manera tal de aumentar el espectro de aplicación del o de los modelos desarrollados, en términos de frecuencia de operación.

### 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, así como también por el Centro de Estudios de Teleinformática (CETI), Universidad Experimental del Táchira (UNET), San Cristóbal, Mérida.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bento Andrade, C. & Fabris Hoefel, R. (May 2010) "IEEE 802.11 WLANs: A Comparison on Indoor Coverage Models". Proceedings of 23rd Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Calgary (CCECE 2010), Canad 

Cheung, K.W., Sau, J.H.M. & Murch, R.D. (August 1998). "A New Empirical Model for Indoor Propagation Prediction". IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 47, No. 3, Pp. 996-101

Commision of the European Communities and Cost Telecommunications (1999). "Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems - COST 231 Final Report", B lgica.

Hamzah, S.A., Baharudin, M.F., Shah, N.M., Abidin, Z.Z. & Ubin, A. (November 2006) "Indoor Channel Prediction and Measurement for Wireless Local Area Network (WLAN) System". Proceedings of the 10 th International Conference on Communication Technology (ICCT '06), China.

Hassan-Mi, M. & Pahlavan, K. (September 1998). Site-specific Wideband and Narrowband Modeling of Indoor Radio Channel Using Ray-Tracing". Proceedings of The Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, USA.

ITU (2009). ITU-R P.1238-6 Recommendation: "Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Indoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 900 MHz to 100 GHz". Suiza.

Joshi, Y. & Pérez García, N. (Abril 2006). "Mediciones de la Potencia Recibida en una Red WLAN Operando en 2,4 GHz, en Ambientes Interiores". Memorias del 2do Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería El ctrica, Electr nica y Computaci n 2006 (II CIBELEC 2006), Venezuela.



Li, B., Dempster, A., Rizos, C. & Barnes, J. (September 2005) "Hybrid Method for Localization Using WLAN". Proceedings of SSC 2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis, Australia

Metageek (Octubre 2010). "inSSIDer". Documento en línea. Disponible en <http://www.metageek.net/products/inssider> Consulta: mayo 2010

OpenOffice.org (Octubre 2010). "OpenOffice.org". Documento en línea. Disponible en <http://www.openoffice.org/> Consulta: mayo 2010

Pabón, C. (Febrero 2010). "Modelo de Propagación para Redes WLAN operando en 2.4 Ghz, en Ambientes Interiores. Trabajo de Grado de Maestría en Electrónica, Mención Telecomunicaciones, San Cristóbal, Venezuela.

Parsons, J.D. (2000). "The Mobile Radio Propagation Channel". 2nd Edition, John Wiley & Sons, Londres, Inglaterra.

Pérez García, N. (Abril 2000). "Cálculo de Cobertura de Sistemas WLL e LMDS". Disserta o de Mestrado em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/Rio), Brasil.

Rappaport, T.S. (2004) "Wireless Communications: Principles and Practice". 2nd Edition, Prentice Hall.

Roldán, D. (2004). "Comunicaciones Inal mbricas". 1era Edición, Editorial Microinformática, Espa a.

Saleh, A. & Valenzuela, R. (February 1987) "A Statistical. Model for Indoor Multipath Propagation". IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 5, No. 2, Pp. 128-137.

Saunders, S. & Arag n-Zavala, A. (2007). "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems". 2nd Edition, John Wiley & Sons, Londres, Inglaterra.

Serrano, A.G. (2008). "Redes Wi-Fi". 1era Edici n, Editorial Anaya, España.

Tarng, J.H. & Liu, T.R. (Mayo 1999). "Effective Models in Evaluating Radio Coverage on Single Floors of Multifloor Buildings". IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 48, No. 3, Pp. 782-789.