



UNA REVISIÓN DE MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES

(A REVIEW OF PROPAGATION PATH LOSS MODELS USED IN THE PLANNING AND
DIMENSIONING OF MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS)

Recibido: 18/05/2016

Aprobado: 24/07/2016

Katia E. Tirado S.

Universidad del Sinú. Montería, Colombia

kaetiso@gmail.com

John J. Muñoz S.

Universidad del Sinú. Montería, Colombia

Jjhon327@hotmail.com

RESUMEN

En el proceso de planificación y dimensionamiento (PyD) de sistemas de comunicaciones móviles, los modelos de propagación constituyen una parte muy importante, ya que los mismos permiten predecir las pérdidas de propagación o el nivel de señal recibido en dichos sistemas, lo cual a su vez permite estimar, por ejemplo, la cobertura de los mismos. En este artículo, se hace una revisión bibliográfica acerca de diversos modelos de propagación que pueden ser utilizados para el proceso de PyD, concretamente, para sistemas inalámbricos celulares. La revisión abarca los modelos más típicamente utilizados para los ambientes en los cuales se implementan los referidos sistemas. La investigación también incorpora algunas comparaciones que la literatura reporta acerca del desempeño de algunos de esos modelos en la estimativa de las pérdidas de propagación o del nivel de señal recibido. Esas comparaciones muestran que el referido desempeño es particular de cada caso de estudio considerado.

Palabras claves: Sistemas inalámbricos celulares, Planificación y dimensionamiento, Modelos de propagación, Comparación.

ABSTRACT

In the process of planning and dimensioning (P&D) of mobile communication systems, propagation models are a very important key, since the same can predict the path loss propagation or the received signal level in such systems; then can also be estimated, for example, the coverage radius of those systems. In this paper, a literature review on various propagation models that can be used for the P&D process, specifically, for cellular wireless systems is made. The review covers those models more typical used of environments in which the above systems are implemented. The research also incorporates some comparisons that literature reports about the performance of some of these models in the

prediction of the path loss propagation or the received signal level. These comparisons show that that performance is particular to each case study considered.

Keywords: *Wireless cellular systems, Planning and dimensioning, Propagation model, Comparison.*

INTRODUCCIÓN

A diferencia de los sistemas inalámbricos de comunicaciones fijas, en los cuales las antenas son estratégicamente posicionadas, sin presentar cambios en dicha posición, en los como sistemas de comunicaciones móviles, también conocidos como sistemas celulares, cuyo receptor puede estar en movimiento o no, el canal es significativamente más sensible a los fenómenos de radio propagación que tienen lugar en el camino entre el transmisor y receptor. Por ejemplo, el hecho de que la altura de la antena efectiva del receptor sea bastante pequeña (típicamente entre 1,6 m y 2 m, que es el rango más común de altura de una persona) hace que dicha antena por lo general esté sumergida entre obstáculos y superficies reflectoras que tienen un significativo impacto en el nivel de potencia recibida. Asimismo, la variación de la distancia transmisor-receptor también influye en el mencionado en la potencia existente en el receptor.

En líneas generales, la trayectoria transmisor-receptor en comunicaciones móviles puede variar desde una simple línea de vista (LOS = *Line of Sight*) hasta una, conocido como “no línea de vista” (NLOS = *Non LOS*), que esté considerablemente obstaculizada por el terreno, edificios, vegetación, etc. [1, 2]. Por tanto, para considerar el efecto de las condiciones de propagación, que son aleatorias, en las comunicaciones móviles e incluso, en comunicaciones inalámbricas fijas, se suele recurrir a la teoría de la probabilidad, en la cual los parámetros del canal son modelados como variables estocásticas, para estimar la influencia de los mismos, por ejemplo, en el radio de cobertura de los sistemas [3]. También, se puede hacer uso de análisis estadísticos, basados en mediciones realizadas específicamente en determinados sistemas y/o bandas de frecuencia y/o tipo de ambientes [4].

Ahora bien, a pesar de que las características de propagación en un sistema inalámbrico de comunicaciones móviles difieren, en varios casos, de manera drásticas (dependiendo de la frecuencia o banda de frecuencia considerada, tipo de ambiente de interés, condiciones climatológicas, entre otros factores), es posible dividir la propagación en dos grandes grupos: a) cielo claro; b) presencia de lluvias.

Propagación bajo cielo claro se refiere a la que se considera para sistemas inalámbricos de telecomunicaciones, fijos o móviles, que no se ven afectados por la presencia de lluvias en el trayecto transmisor-receptor porque operan en frecuencias inferiores a aproximadamente los 10 GHz [5].

Aquí es importante resaltar que, el fenómeno de lluvia es la principal causa de la atenuación de la señal en sistemas de telecomunicaciones que operan en frecuencias superiores a 10 GHz, ya que a partir de esta frecuencia la longitud de onda de la señal se torna del mismo o menor orden de magnitud que el tamaño de la gota de agua, por lo que



ésta deja de ser un medio eléctricamente transparente a la onda electromagnética y debido a las condiciones de contorno que se tienen que cumplir en las superficie de la gota, parte de la señal pasa por dicha gota, sufriendo previamente pérdida por absorción (calentamiento de la gota análogo al que ocurre cuando una corriente eléctrica circula por un conductor), y otra parte es dispersada en otras direcciones, algunas de las cuales no alcanzan al receptor [6-8].

También es oportuno resaltar que en el presente trabajo, el interés se centrará en los sistemas de comunicaciones móviles que operan en frecuencias inferiores a 10 GHz, es decir, no sufren atenuación por lluvias; y más específicamente, en los modelos de propagación para sistemas de telefonía celular.

En cielo claro los principales aspectos de propagación a ser considerados tienen que ver con los efectos causados por la reflexión, difracción y dispersión de la señal, en el nivel de potencia recibida [9, 10]. En realidad, la gran mayoría de los sistemas de comunicaciones móviles operan en áreas urbanas en las cuales la probabilidad de que no exista línea de vista entre transmisor y receptor, así como la presencia de las edificaciones, es alta, lo que causa fuertes pérdidas por difracción. Por su parte, las reflexiones hacen con que las ondas electromagnéticas viajen hasta el receptor a través de diferentes caminos que tienen diferentes longitudes. Por tanto, además de la natural disminución de la potencia recibida con la distancia, la interacción de esas diversas versiones de la misma señal en el receptor produce desvanecimiento por trayectoria múltiple que produce incluso ocasionar hasta la salida de operación del sistema por instantes de tiempo [11].

De allí la importancia de los modelos de propagación, pues los mismos permiten prever la intensidad media de la señal a una determinada distancia del transmisor, así como la variabilidad de dicha intensidad en torno a esa media. La primera es considerada en el cálculo de la cobertura, así como en la estimación de la interferencia en áreas adyacentes; mientras que la variabilidad de la señal, que puede ser clasificada en efectos de gran escala (sombreamiento) y pequeña escala (propagación por trayectoria múltiple, es tomada en cuenta para estimar el desempeño del sistema [12, 13].

MODELOS BÁSICOS DE PROPAGACIÓN

La filosofía básica de todo modelo de propagación, independientemente de la banda de frecuencia, tipo de ambiente, etc., para la cual sea desarrollado, busca como mínimo establecer la relación existente entre la potencia transmitida, potencia recibida, frecuencia (f) de operación y distancia (d) entre transmisor y receptor.

En ese sentido, el modelo de propagación más elemental que se conoce en la literatura, es el modelo que permite predecir las pérdidas en espacio libre, el cual es aplicado cuando entre transmisor y receptor existe línea de vista no obstruida y, además, no existe efecto alguno de la superficie terrestre en el nivel de señal recibido o potencia recibida, es decir, el receptor es alcanzado solamente por la onda electromagnética que se propaga a través de esa línea de vista [14].



El modelo de propagación en espacio libre establece que la relación entre la potencia recibida, P_R , y la potencia transmitida, P_T , es calculada a través de [15]:

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \quad (1)$$

Donde G_T y G_R son las ganancias, en unidades lineales, de las antenas transmisora y receptora, respectivamente, " λ " se refiere a la longitud de onda (metros) y " c " es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

A partir de la expresión (1), conocida como la ecuación de Friis, la pérdida de propagación, L , se determina mediante:

$$L(\text{dB}) = 92,44 + 20 \log d(\text{km}) + 20 \log f(\text{GHz}) - G_T(\text{dB}_i) - G_R(\text{dB}_i) \quad (2)$$

En la ecuación (2) se puede observar que la variación de la pérdida de propagación en espacio libre con la frecuencia y la distancia es de 20 dB/década.

Otro modelo de propagación considerado entre los básicos es del llamado modelo de tierra plana, también conocido como el modelo de dos rayos. Este modelo se basa en el hecho de que para las frecuencias superiores a las de la banda MF (*Medium Frequency*) la propagación se lleva a cabo a través de la denominada onda espacial (onda directa entre las antenas más una onda reflejada en la superficie terrestre), despreciándose el efecto de la onda superficial (que viaja a través de la superficie terrestre) [16].

Para el modelo de tierra plana, la relación entre las potencia P_R y P_T es dada por [5]:

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{h_T h_R}{d^2} \right)^2 G_T G_R \quad (3)$$

$$L(\text{dB}) = 120 + 40 \log d(\text{km}) - 20 \log [h_T(\text{m}) h_R(\text{m})] - G_T(\text{dB}_i) - G_R(\text{dB}_i) \quad (4)$$

Donde h_T y h_R son las alturas efectivas (medidas sobre la superficie terrestre) de las antenas transmisora y receptora, respectivamente.

En la expresión (4) se aprecia que las pérdidas para una onda electromagnética en presencia de tierra plana no dependen de la frecuencia, lo que representa una notoria deficiencia de dicho modelo. También se observa que en este caso, la pérdida de potencia es a razón de 40 dB/década, es decir, mayor al caso de pérdidas en espacio libre.

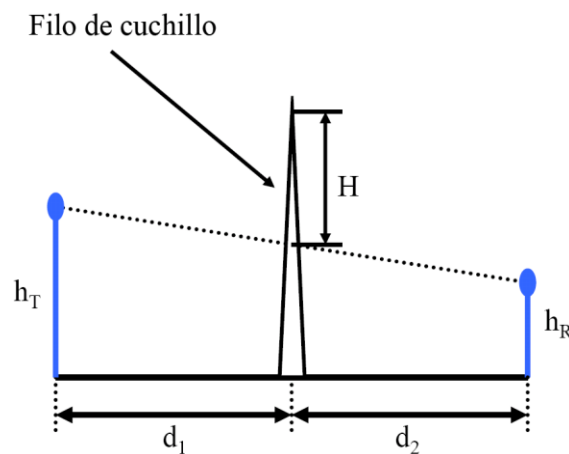
Ahora bien, de las expresiones (2) y (4), se observa que las pérdidas de propagación, en general, pudieran escribirse como:

$$L(\text{dB}) = L_o(\text{dB}) + 10n \log d \quad (5)$$

Donde “n” es conocido como exponente de pérdidas de potencia con la distancia, siendo igual a 2 para el espacio libre y 4 para tierra plana.

El tercer modelo de propagación perteneciente al grupo de modelos básicos es del desarrollado para estimar las pérdidas de la señal debido a la presencia de un obstáculo, tipo de “filo de cuchillo”, obstruyendo totalmente la línea directa entre las antenas o cercano a dicha línea. Dicho modelo es conocido como modelo de pérdidas de por difracción debido a un “filo de cuchillo”, mostrado en la Figura 1.

Figura 1. Geometría para la difracción por filo de cuchillo



En la Figura 1, d_1 representan la distancia entre el transmisor y el punto de ubicación de obstáculo, d_2 es la distancia entre ese punto de ubicación de obstáculo y el receptor y “H”, mejor conocida, como “despeje”, es la distancia entre la punta del obstáculo y la intersección del mismo con la línea directa entre las antenas.

Existen varios modelos para predecir las pérdidas de propagación debido a la presencia de obstáculos en la línea de vista directa entre transmisor y receptor. El más sencillo de ellos, que aparece en la Recomendación ITU-R P.526-13 [17], considera apenas un obstáculo, específicamente, con forma de filo de cuchillo. En este caso, las pérdidas de propagación se obtienen a partir de:

$$L(\text{dB}) = L_{\text{el}}(\text{dB}) + 6,9 + 20 \log \left[\sqrt{(v_0 - 0,1)^2 + 1} + v_0 - 0,1 \right]; \quad v_0 > -0,78 \quad (6)$$

Donde L_{el} se refiere a las pérdidas en espacio libre y v_0 es un parámetro adimensional que asume una variedad de formas equivalentes dependiendo de los parámetros considerados para su cálculo. Por ejemplo, en el caso de la Figura 1 se tiene:

$$v_0 \approx -\sqrt{2} \frac{H}{R_1} = -H \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (7)$$



En la expresión (7), la distancia “H” se considera negativa cuando el extremo del obstáculo está por encima de la línea de vista directa y positiva en caso contrario.

Es importante resaltar que, que el valor mínimo de “H” que debe cumplirse para que las pérdidas por difracción no dejen fuera del aire a un sistema inalámbrico de comunicaciones depende de las características de propagación propias de la zona, así como del porcentaje de disponibilidad planificado por el operador del sistema. Un caso típico, aunque no necesariamente el común, es el que se tiene para una atmósfera estándar (factor de radio efectivo de la Tierra igual a 4/3) y una disponibilidad del enlace de hasta 99,9%, en cuyo caso el despeje desde ser al menos de $0.6R_1$, es decir, al 60% del radio de la primera zona de Fresnel [18].

Asimismo, es oportuno destacar que el obstáculo puede ser considerado redondeado, en cuyo caso la Recomendación ITU-R P.526-13 [17] también establece un modelo para la estimación de las pérdidas por difracción.

Finalmente, cuando se tienen más de un obstáculo entre el transmisor y el receptor, se pueden ser utilizados los modelos de Epstein y Peterson [19], Recomendación ITU-R P.526-13 [17], Bullington [20], Deygout [21], De Asis [22], Delta-Bullington [23], Giovanelli [24], entre otros.

MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES

Modelo de Okumura

El japonés Yoshihisa Okumura, en base a una extensiva campaña de mediciones realizadas en la ciudad de Tokio, Japón, y sus alrededores, desarrolló un modelo de propagación en el que consideró frecuencia de transmisión, altura de la antena transmisora, tipo de zona o ambiente (urbano, suburbano o casi-urbano y abierto o rural) [25].

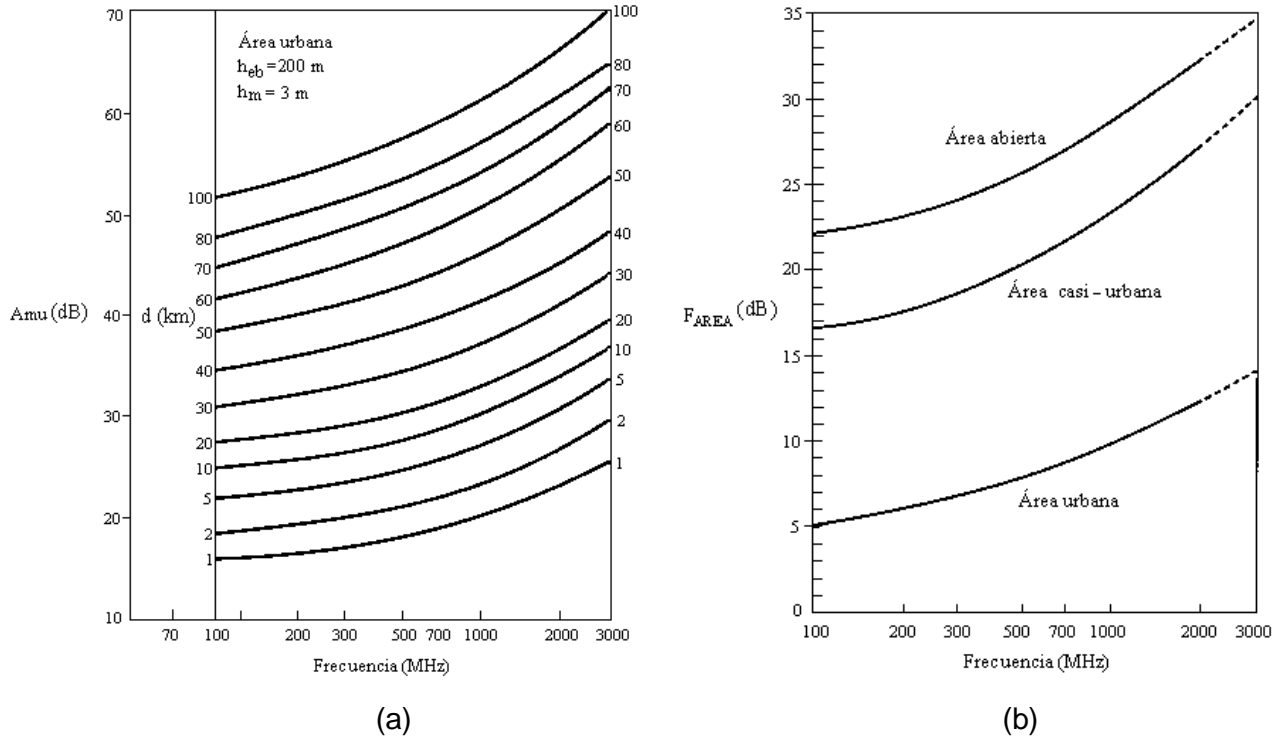
Se trata de un modelo empírico aplicable a frecuencia comprendidas entre 150 MHz y 1920 MHz, aunque también se emplea para frecuencias hasta 3 GHz. Es válido preferiblemente para alturas de la antena del transmisor entre 30 m y 1 km, así como distancias transmisor-receptor desde 1 km hasta 100 km.

El modelo Okumura se basa en un conjunto de curvas que permiten obtener la atenuación media, A_{mu} , en función de la distancia y frecuencia del enlace, para una altura efectiva de la antena de la estación radio base, h_{eb} , de 200 m y una altura del móvil, h_m , de 3 m; valores, a decir verdad, elevados en comparación con los valores típicos reales. La pérdida total es la suma de la atenuación A_{mu} y la pérdida en el espacio libre L_{el} , disminuida por tres (3) factores de ganancia: F_{eb} (debido a la altura de la antena de la estación base), F_m (debido a la altura del móvil) y F_{AREA} (debido al tipo de ambiente). Es decir, la pérdida total de propagación es dada por [26]:

$$L(\text{dB}) = L_{el}(\text{dB}) + A_{mu}(\text{dB}) - F_{eb} - F_m - F_{AREA} \quad (8)$$

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 2a y 2b.

Figura 2. a) Atenuación media en el modelo de Okumura; b) Factor de corrección por el tipo de ambiente o área



Finalmente, los factores debidos a las ganancias de las antenas son dados por:

$$F_{eb} = 20 \log \left(\frac{h_{eb}}{200} \right); \quad 10 \text{ m} < h_{eb} < 1000 \text{ m} \quad (9)$$

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

La ecuación (8), en conjunto con las Figuras 2a y 2b y las ecuaciones (9) y (10), muestran claramente que: a) Las pérdidas de propagación aumentan con el incremento de la frecuencia y también con el aumento de la distancia transmisor-receptor; b) Las pérdidas de propagación en ambientes urbanos son mayores que las encontradas en áreas suburbanas o casi-urbanas, y mayor aún, en comparación con el caso de reas abiertas o rurales. Ello se debe a que en las áreas suburbanas y rurales la presencia de obstáculos entre transmisor y receptor es menor que en el caso de ambientes urbanos; c) Las pérdidas de propagación disminuyen con el aumento de la altura de la antena de la estación base y/o la altura del móvil.

Modelo de Okumura-Hata

Con el propósito de facilitar la utilización del modelo de Okumura, Masaharu Hata dedujo, en 1.980, una serie de fórmulas matemática empíricas para facilitar el uso de la información gráfica suministrada por el modelo de Okumura, resultando [27-29]:

$$L = A + B \log d + C \quad (11)$$

Donde:

$$A = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_1 - a(h_2) \quad (12a)$$

$$B = (44,9 - 6,55 \log h_1) \log d \quad (12b)$$

Donde “f” es la frecuencia de operación (entre 150 MHz y 1500 MHz), “d” es la distancia transmisor-receptor (entre 1 km y 20 km), h_1 es representa altura efectiva de la antena transmisora (entre 30 m y 200 m), h_2 se refiere a la altura efectiva de la antena receptora (entre 1 m y 10 m) y “C” depende de la frecuencia y del ambiente o zona de servicio de acuerdo a:

- Áreas urbanas:

Ciudades grandes

$$a(h_2) = \begin{cases} 8,29[\log(1,54h_2)]^2 - 1,1; & f < 300 \text{ MHz} \\ 3,2[\log(11,75h_2)]^2 - 4,97; & f \geq 300 \text{ MHz} \end{cases} \quad \text{y } C = 0 \quad (12c)$$

Ciudades medianas y pequeñas

$$a(h_2) = [1,1 \log(f) - 0,7]h_2 - [1,56 \log(f) - 0,8] \quad \text{y } C = 0 \quad (12d)$$

- Áreas suburbanas:

$$C = -2\left[\log\left(\frac{f}{28}\right)\right]^2 - 5,4 \quad (12e)$$

- Áreas rurales o abiertas:

$$C = -4,78[\log(f)]^2 + 18,33\log(f) - 40,98 \quad (12f)$$

Para áreas suburbanas y rurales, el factor de $a(h_2)$ se calcula igual que para el caso de ciudades medianas y pequeñas de acuerdo a la expresión (12d).



Es oportuno resaltar que, de acuerdo a la ecuación (12b) el exponente de pérdidas de propagación depende de la altura de la antena del transmisor y es igual a $4,49 - 0,655 \log h_1$

Modelo de Hata Extendido (COST-231 Hata)

Es el resultado del trabajo del comité COST-231 de la EURO-COST (*European Cooperative for Scientific and Technical*), a partir del cual se obtuvo una versión extendida del modelo Okumura-Hata válida para frecuencias entre 1500 MHz y 2000 MHz y en la cual la pérdida de propagación se determina a partir de [30, 31]:

$$L = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_1 - a(h_2) + (44,9 - 6,55 \log h_1) \log d + C_M \quad (13)$$

Donde C_M es igual a 3 dB para áreas metropolitanas y 0 dB para ciudades medianas y áreas suburbanas.

Las alturas efectivas del transmisor y el receptor, así como la distancia transmisor-receptor están en los mismos rangos de validez del modelo Okumura-Hata. Además, el factor $a(h_2)$ se calcula mediante las ecuaciones (12c) y (12d).

Modelo de Young

El modelo de Young fue basado en medidas realizadas en la ciudad de New York en 1.952, considerando edificaciones altas. Es válido para frecuencias entre 150 MHz y 3,7 GHz. La pérdida de propagación es dada por [32, 33]:

$$L(\text{dB}) = -G_{\text{eb}} - G_m - 20 \log h_{\text{eb}} - 20 \log h_m + 40 \log d + \beta \quad (14)$$

Donde G_{eb} y G_m son las ganancias, en dBi, de la antena de la estación radio base y la antena del móvil, respectivamente, h_{eb} y h_m son las altura, en metros, de la antena de la estación radio y la antena del móvil, mientras que β representa un factor de densidad de edificios.

Los valores de β para 150 MHz, 450 MHz y 900 MHz son dados por Young [26] para diferentes porcentajes de localidades no excedidos por las pérdidas de propagación. Por ejemplo, para 150 MHz el valor de β es de 25 dB [33].

A su vez, en la ecuación (14) se observa que en el modelo de Young el exponente de pérdidas de potencia es igual a 4, que es el mismo del clásico modelo de tierra plana [5].

Modelo de Lee

Diseñado por William C. Lee en 1.977 para macroceldas urbanas y suburbanas para obtener las características de propagación en la banda UHF (*Ultra High Frequency*). El modelo toma en cuenta parámetros tales como la densidad de árboles que existen en la zona, propagación sobre el agua (de ser el caso), elevación del móvil respecto a la estación



base y, además, considera la difracción y reflexión de la señal que se presenta cuando existe un obstáculo en la trayectoria entre la estación base y el móvil [34].

El modelo de Lee puede aplicarse en diferentes ambientes, tales como áreas urbanas, áreas abiertas, áreas suburbanas, así como también en terrenos naturales como terrenos planos y montañosos. Las pérdidas de propagación vienen dadas por [34]:

$$L(\text{dB}) = -10 \log \mu_{\Omega_0} - 10 \gamma \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 10 n \log \left(\frac{f}{f_c} \right) - 10 \log F_A \quad (15)$$

Donde:

μ_{Ω_0} = Potencia medida a 1,6 km del transmisor (ver la Tabla 3.1)

γ = Coeficiente de pérdidas de la potencia con la distancia (ver la Tabla 1)

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_A = Factor de ajuste = $F_{h_{eb}} F_{h_m} F_{P_T} F_{G_{eb}} F_{G_m}$

$F_{h_{eb}}$ = Factor de ajuste por la altura de la estación base

F_{h_m} = Factor de ajuste por la altura del móvil

F_{P_T} = Factor de ajuste por la potencia del transmisor

$F_{G_{eb}}$ = Factor de ajuste por la ganancia de la antena de la estación base

F_{G_m} = Factor de ajuste por la ganancia de la antena del móvil

$$F_{h_{eb}} = \left[\frac{h_{eb}(\text{m})}{30,48 \text{ m}} \right]^2; F_{h_m} = \left[\frac{h_m(\text{m})}{3 \text{ m}} \right]^\beta; F_{P_T} = \left[\frac{P_T(\text{W})}{10 \text{ W}} \right]^2; F_{G_{eb}} = \left[\frac{G_{eb}(\text{unidades lineales})}{4} \right]$$

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

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

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

Tabla 1. Parámetros del modelo 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

Modelo de Sakagami-Kuboi

Se trata de otro conjunto de ecuaciones del modelo de Okumura, obtenidas mediante el uso de múltiple regresión no lineal a una parte de los datos recolectados en la ciudad de Tokio, por Okumura. Las pérdidas de propagación de este modelo se estiman a partir [35, 36]:

$$L(\text{dB}) = 100 - 7,1 \log W + 0,023 \theta + 1,4 \log h_s + 6,1 \log H - \left[24,37 - 3,7 \left(\frac{h_s}{h_{T_0}} \right)^2 \right] \log h_{eb} + (43,32 - 3,1 \log h_{eb}) \log d + 20 \log f + e^{13(\log f - 3,23)} \quad (16)$$

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_{T_0} = Altura del terreno en la estación en la radio base

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

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

Existe una versión del modelo de Sakagami-Kuboi obtenida mediante la aplicación de múltiple regresión a las ecuaciones originales, en base a mediciones realizadas en Japón. Las pérdidas son dadas por [36]:

$$L = 42 \log d - 30 \log H + 21 \log f + 0,3 \theta - 0,003 \theta^2 - 9 \log W - 5 \log \left(\frac{h_m}{1,5} \right) + 54 \quad (17)$$

Donde h_m representa la altura de la antena del receptor, el rango de frecuencias está entre 0,8 GHz a 8 GHz, la altura de la antena del transmisor va desde 10 m a 100 m y la distancia transmisor-receptor se encuentre en el rango entre 100 m a 3 km.

Modelo de Walfish-Bertoni

Este modelo se basa en la Teoría Uniforme de Difracción (UTD = *Uniform Theory Diffraction*) [37] y es conocido como modelo de pantallas de difracción (*diffracting screens model*). Permite estimar las pérdidas de propagación en ambientes urbanos considerando la difracción de la señal en los techos de los edificios.

Ahora bien, dado que en algunos casos la señal sufre múltiples difracciones después de pasar una hilera de edificios, estas hileras son modeladas como un conjunto de pantallas de difracción y absorción, las cuales son responsables de las pérdidas de propagación debido a la cercanía de los edificios [38].

Las pérdidas de propagación se determinan a partir de [26, 37]:

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

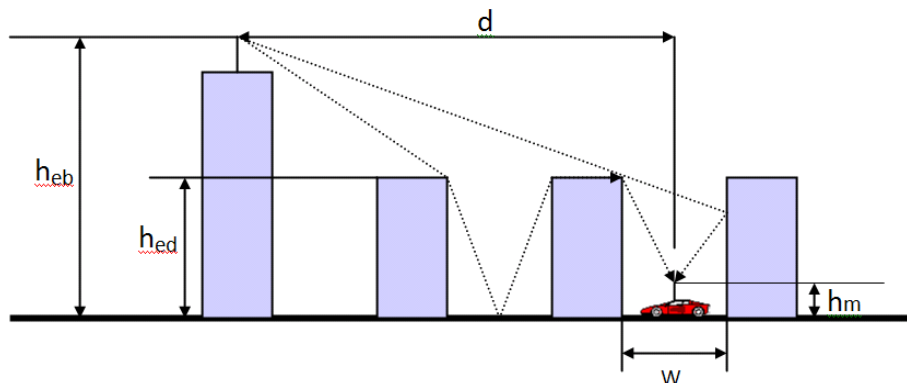
Donde el factor “A”, asociado a las pérdidas por la presencia de los edificios en la trayectoria transmisor-receptor, es dado por:

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{w}{2} \right)^2 + (h_{\text{ed}} - h_m)^2 \right] - 9 \log w + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2(h_{\text{ed}} - h_m)}{w} \right] \right\} \quad (18b)$$

Donde h_{eb} es la altura de la antena de la estación base respecto al suelo (en metros), h_{ed} representa la altura media de los edificios (en metros), h_m se refiere a la altura de la antena del móvil respecto al suelo (en metros) y “w” es la separación entre edificios (en metros)

En la Figura 3 se ilustra la geometría asociada a la aplicación del modelo Walfish-Bertoni.

Figura 3. Geometría utilizada para el modelo Walfish-Bertoni



Modelo de Walfish-Ikegami

Es un método desarrollado para entornos con línea de vista o LOS = Line of Sight entre transmisor y receptor, así como para ambientes en los que no existe línea de vista entre esos puntos o NLOS. Se aplica tanto a macroceldas como microceldas, en zonas urbanas con terrenos considerados planos [5, 39].

- LOS

$$L(\text{dB}) = 42,6 + 20 \log f + 26 \log d \quad (19)$$

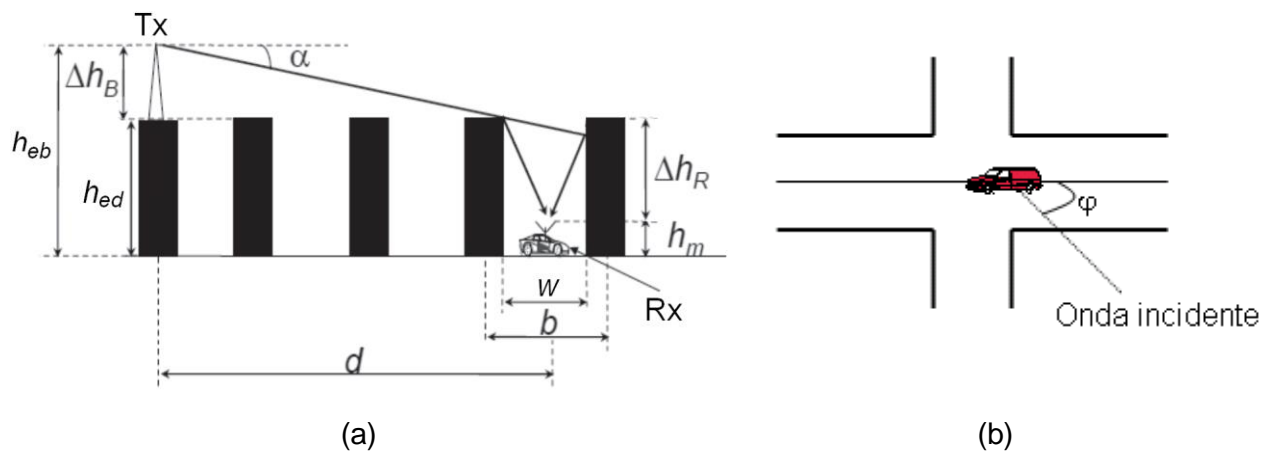
Donde “f” está en el rango entre 800 MHz y 2000 MHz, mientras que “d” es válida hasta 20 km.

- NLOS

$$L(\text{dB}) = 32,4 + (20 + k_f) \log f + L_{\text{rts}} + L_{\text{bsh}} + k_a - 9 \log b + (20 + k_d) \log d \quad (20)$$

Donde todos los parámetros de topología están referidos a las Figuras 4a y 4b [5, 40], L_{rts} representa la pérdida debido a la difracción del techo hacia la calle y L_{bsh} corresponde a la pérdida por difracción múltiple debido a la hilera de edificios.

Figura 4. a) Geometría utilizada para el modelo Walfish-Ikegami; b) Ángulo horizontal de arribo, φ , de la señal la señal incidente



Por su parte, la pérdida L_{rts} es determinada mediante [5]:

$$L_{\text{rts}} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_R + L_{\text{ori}}; \quad \text{para } L_{\text{rts}} > 0 \quad (21a)$$

$$L_{\text{rts}} = 0; \quad \text{para } L_{\text{rts}} < 0 \quad (21b)$$

El parámetro k_f depende de la frecuencia de operación y del tipo de ciudad (grande, mediana o pequeña):

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right), \quad \text{para ciudades medias y pequeñas} \quad (22a)$$

$$k_f = -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right), \quad \text{para centros metropolitanos} \quad (22b)$$

Por su parte, k_a depende de la altura de la antena de la estación base respecto al suelo, altura promedio de los edificios y la distancia transmisor-receptor:

$$k_a = 54, \quad \text{para } h_{eb} > h_{ed} \quad (23a)$$

$$k_a = 54 - 0,8 \Delta h_B, \quad \text{para } h_{eb} \leq h_{ed} \text{ y } d \geq 0,5 \text{ km} \quad (23b)$$

$$k_a = 54 - 1,6\Delta h_B, \quad \text{para } h_{eb} \leq h_{ed} \text{ y } d < 0,5 \text{ km} \quad (23c)$$

En el caso del parámetro k_d , el mismo depende de la altura de la estación base y la altura promedio de los edificios:

$$k_d = 18, \quad \text{para } h_{eb} \leq h_{ed} \quad (24a)$$

$$k_d = 18 - 15 \left(\frac{\Delta h_B}{h_{ed}} \right), \quad \text{para } h_{eb} > h_{ed} \quad (24b)$$

Las pérdidas L_{ori} son debidas al ángulo horizontal con el que la señal arriba al receptor:

$$L_{ori} = -10 + 0,354\varphi, \quad \text{para } 0 \leq \varphi \leq 35^\circ \quad (25a)$$

$$L_{ori} = 2,5 + 0,075(\varphi - 35), \quad \text{para } 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \quad (25b)$$

$$L_{ori} = 4,0 + 0,114(\varphi - 55), \quad \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \quad (25c)$$

Finalmente, las pérdidas L_{bsh} también dependen de la altura de la estación base y la altura media de los edificios:

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_B), \quad \text{para } h_{eb} > h_{ed} \quad (26a)$$

$$L_{bsh} = 0, \quad \text{para } h_{eb} < h_{ed} \quad (26b)$$

Modelo MOPEM

El **M**odelo de **P**ropagación para **E**ntornos urbanos de pequeñas **M**acroceldas (MPOEM) fue desarrollado ajustando el modelo de Walfish-Ikegami en base a mediciones realizadas en la ciudad de Montevideo, Uruguay. Es válido para la banda de frecuencia entre 850 MHz y 900 MHz. En este caso, las pérdidas de propagación son dadas por [41]:

$$L_{MOPEM} = L_0 + L_{rts-MOPEM} + L_{msd-MOPEM} + L_{esq} \quad (27a)$$

$$L_{rts-MOPEM} = 1,87 - 10 \log w + 10 \log f + 10,4 \log(h_{ed} - h_m) + L_{ori-MOPEM} \quad (27b)$$

$$L_{ori-MOPEM} = -2,8 \left(\frac{\varphi}{45} \right)^4 + 13,2 \left(\frac{\varphi}{45} \right)^3 - 29,5 \left(\frac{\varphi}{45} \right)^2 + 30,3 \left(\frac{\varphi}{45} \right) - 3,5 \quad (27c)$$

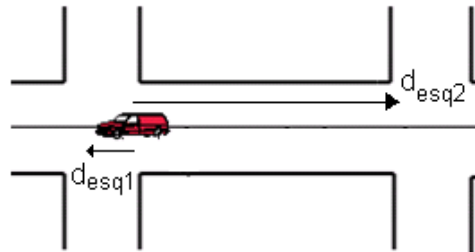
$$L_{msd-MOPEM} = 54 - 18 \log(1 + \Delta h_B - h_{ed}) + k_f \log f + 27,7 \log d - 9 \log b \quad (27d)$$

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (27e)$$

$$L_{esq} = -11,32 + 3,3[\log(d_{esq1}) + \log(d_{esq2})] \quad (27f)$$

Donde d_{esq1} y d_{esq2} están dadas en metros y corresponden a las distancias desde el móvil a cada centro de la intersección de las calles, tal como se define en la Figura 5.

Figura 5. Distancias d_{eq1} y d_{eq2}



Es oportuno resaltar que, los parámetros geométricos del escenario de aplicación del MPOEM, aparecen en las Figuras 4a y 4b.

Modelo SUI (Stanford University Interim) Extendido

Está basado en el modelo SUI originalmente propuesto por Erceg y colaboradores [42], el cual es una extensión hasta frecuencias de operación cercanas a los 2 GHz del modelo Okumura-Hata. Posteriormente, fue adicionado un factor de corrección que permite que el modelo pueda ser utilizado hasta frecuencias de operación superiores a los 2 GHz [43].

El modelo SUI es válido para distancias transmisor-receptor "d" hasta 10 km, alturas de la antena de la estación base " h_b " entre 10 m y 80 m, altura de la antena del receptor " h_m " de 2 m a 10 m y un elevado porcentaje de cobertura (entre 80% y 90%) [42, 44]. Además, el modelo en cuestión considera tres (3) tipos de terrenos o ambientes: a) Tipo A (montañoso con nivel de vegetación de medio y alto); b) Tipo B (montañoso con bajo nivel de vegetación); c) Tipo C (plano con muy baja o nula densidad de vegetación).

El grupo IEEE 802.16 adoptó el modelo SUI para aplicaciones de sistemas inalámbricos fijos de banda ancha. Asimismo, el modelo es considerado para la planificación y dimensionamiento de sistemas WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), especialmente en la banda de 3,5 GHz [45].

Las pérdidas de propagación se calculan mediante [45]:

$$L = \begin{cases} 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right); & \text{para } d \leq d'_0 \\ A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{100}\right) + \Delta L_f + \Delta L_{h_m}; & \text{para } d > d'_0 \end{cases} \quad (28a)$$

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d'_0}{\lambda}\right) \quad (28b)$$



$$d'_0 = 10^{\left[2 - \left(\frac{\Delta L_f + \Delta L_{h_m}}{10\gamma}\right)\right]} \quad (28c)$$

$$\gamma = a - b h_b + \frac{c}{h_b} \quad (28d)$$

$$\Delta L_f = 6 \log \left(\frac{f(\text{MHz})}{2000} \right) \quad (28e)$$

$$\Delta L_{h_R} = \begin{cases} -10 \log \left(\frac{h_m}{3} \right); & \text{para } h_m \leq 3 \text{ m} \\ -20 \log \left(\frac{h_m}{3} \right); & \text{para } h_m > 3 \text{ m} \end{cases} \quad (28f)$$

Los valores “a”, “b” y “c” dependen del tipo de terreno y aparecen en [46].

Modelo ECC

Desarrollado por el ECC (*Electronic Communication Committee*) es el resultado de una extrapolación de las mediciones realizadas por Okumura, a los ambientes de una ciudad típica de Europa [46].

En general, las pérdidas de propagación según el modelo ECC-33, está compuesta por cuatro (4) términos [47]:

$$L(\text{dB}) = L_{el} + L_{b_m} - G_b - G_m \quad (29)$$

Donde L_{b_m} es la pérdida de propagación básica media y G_b y G_m representan los factores de ganancia, en dB, debido a la altura de la antena de la estación base y a la altura de la antena del móvil, respectivamente.

Las pérdidas de propagación básica media, L_{b_m} , que en realidad representan un ajuste debido a la frecuencia y a la distancia, son iguales a:

$$L_{b_m} = 20,41 + 9,83 \log d + 7,894 \log f + 9,56[\log f]^2 \quad (30)$$

Por su parte, la ganancia G_b debida a la altura de la antena de la estación base, que depende de la altura efectiva de dicha antena (h_b) y la distancia transmisor-receptor, se determina mediante:

$$G_b = \log \left(\frac{h_b}{200} \right) [13,958 + 5,8(\log d)^2] \quad (31)$$

Finalmente, la ganancia G_m es producto de la altura de la antena del móvil (h_m) y es dada por:

$$G_m = (42,57 + 13,7 \log f)(\log h_m - 0,585), \quad \text{para ciudades medias} \quad (32a)$$

$$G_m = 0,759 h_m - 1,892, \quad \text{para ciudades grandes} \quad (32b)$$

Modelo Ericsson 9999

Es otra versión ajustada del modelo Okumura-Hata, con validez hasta una frecuencia de 1900 MHz. Las pérdidas de propagación vienen dadas por [48]:

$$L(\text{dB}) = a_0 + a_1 \log d + a_2 \log h_b + a_3 (\log h_b)(\log d) - 3,2[\log(11,75 h_r)]^2 + g(f) \quad (33a)$$

$$g(f) = 44,49 \log f - 4,78(\log f)^2 \quad (33b)$$

Donde h_b y h_r representan las alturas efectivas de las antenas transmisora y receptora, respectivamente.

Los parámetros a_0 , a_1 , a_2 , y a_3 , se pueden ajustar de acuerdo a mediciones locales. Por defecto, los valores de dichos parámetros son [49]:

$$a_0 = 36,2$$

$$a_1 = 30,2$$

$$a_2 = 12$$

$$a_3 = 0,1$$

Algunos Resultados de Comparación entre Modelos Reportados en la Literatura

En esta sección, se presentarán algunos de los resultados, reportados en la literatura, en relación a la comparación entre los valores estimados en algunos de esos modelos y valores reales o medidos.

Así, por ejemplo, Mollel y Kisangiri [50] reportan los resultados de una campaña de mediciones realizada en la ciudad de Dar es-Salaam, Tanzania, en una frecuencia igual a 900 MHz, y las comparan con los valores de pérdidas de propagación estimados por los modelos SUI, COST-231 Hata, ECC-33, Okumura-Hata y Ericsson 9999. En la Figura 6, se observan los resultados obtenidos para una zona rural. Se aprecia que en ese caso, los modelos Okumura-Hata y Ericsson subestiman las pérdidas de propagación real, mientras que la desviación respecto a las mediciones por parte de los modelos COST-231 Hata y SUI es la más baja.

Por su parte, Mawjoud [51], en base a mediciones realizadas en la ciudad de Erbil, Irak, a una frecuencia de operación de 2,6 GHz, ajusta los modelos Log-distance [12]. COST-231 Hata y SUI, e incorpora a su trabajo la comparación entre los valores medidos y los estimados por dichos modelos, así como los calculados por las versiones originales de los modelos COST-231 Hata y SUI. La Figura 7 muestra los resultados y comparaciones en cuestión, para una zona urbana.

Figura 6. Valores estimados y medidos de pérdidas de propagación en Dar es-Salaam, Tanzania (900 MHz, ambiente exterior de una zona rural)

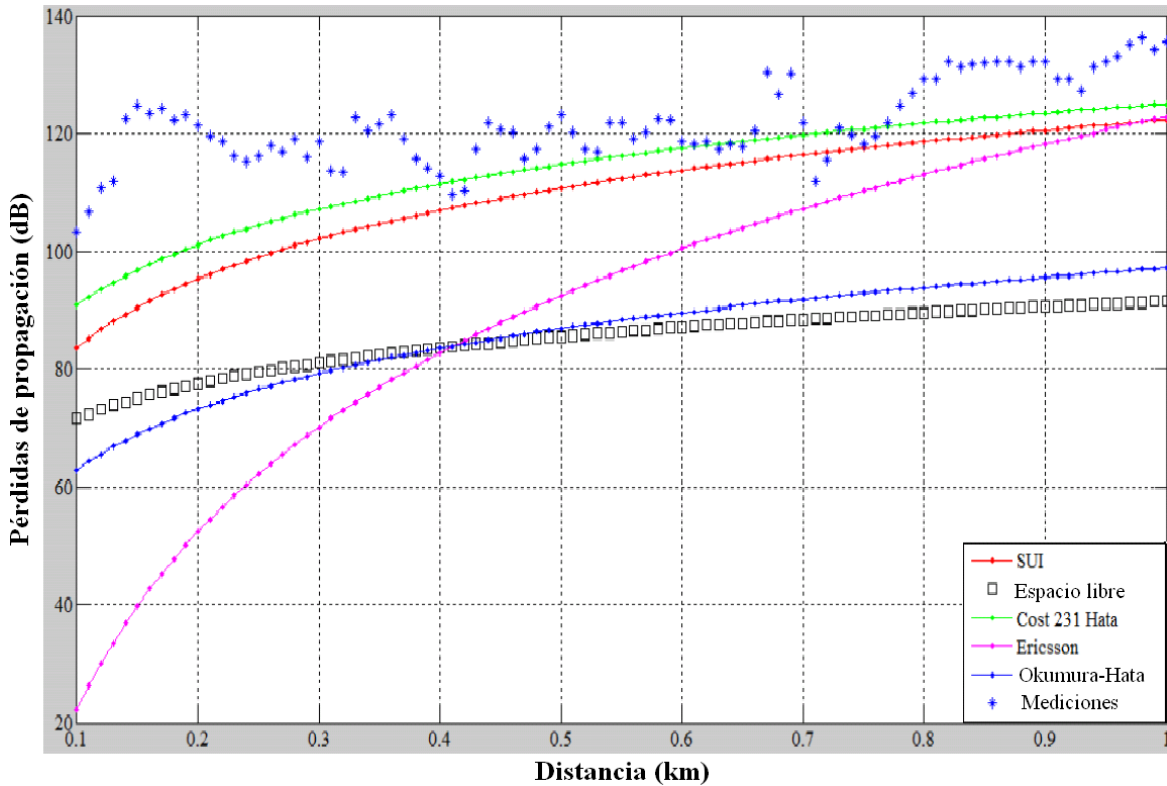
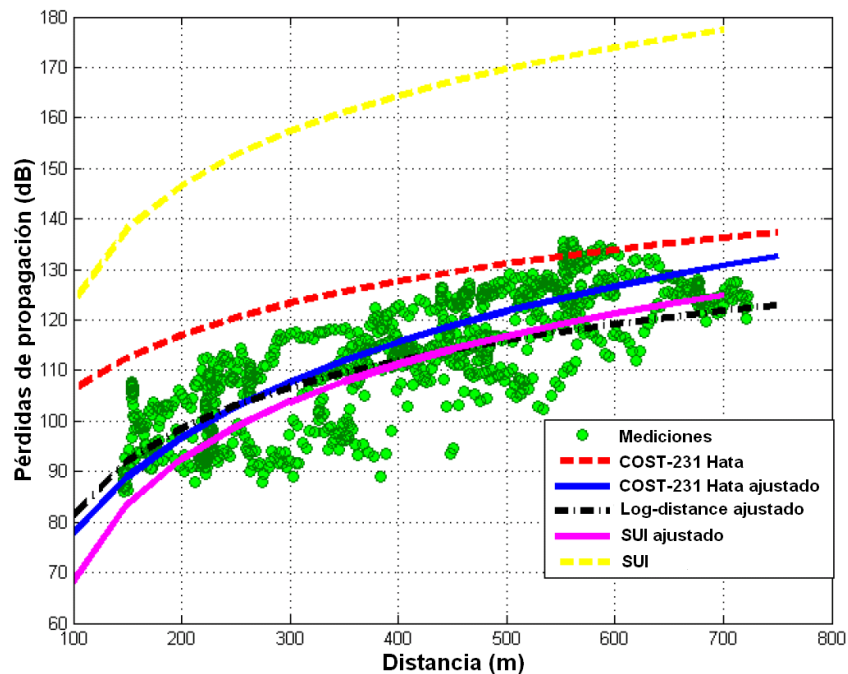


Figura 7. Valores estimados y medidos de pérdidas de propagación en Erbil, Irak (2,6 GHz, ambiente exterior de una zona suburbana)





En la Figura 7, se observa que los modelos SUI y COST-231 Hata sobreestiman los valores reales de pérdidas de propagación, mientras que las versiones ajustadas de los modelos Log-distance, COST-231 Hata y SUI muestran un mejor desempeño. Específicamente, en términos cuantitativos, Mawjoud recurre a la raíz del error medio cuadrático (RMSE = *Root Mean Square Error*), para mostrar que en su caso de estudio el modelo que mostró mejor desempeño fue COST-231 Hata ajustado, con el RMSE más bajo (7,6 dB), aunque los otros dos (2) modelos ajustados también presentaron valores RMSE cercanos al arrojado por el modelo COST-231 Hata, específicamente, 7,82 dB y 8,28 dB, para los modelos Log-*distance* ajustado y SUI ajustado.

Conclusiones

Entre los modelos incluidos en la revisión bibliográfica objeto del presente trabajo, están los llamados modelos básicos de propagación, que aplican prácticamente a todos los sistemas inalámbricos celulares, pero no consideran las condiciones típicas reales de los ambientes en los cuales se implementan dichos sistemas. Específicamente, se revisaron los modelos que estiman las pérdidas de propagación en espacio libre, en presencia de tierra plana y en presencia de un obstáculo tipo “filo de cuchillo”. Asimismo, se incluyeron modelos más correlacionados con las condiciones de propagación clásicas de las zonas de servicio de los sistemas inalámbricos celulares, se revisaron, entre otros, los modelos de Okumura-Hata, COST-231 Hata, Lee, Walfish-Bertoni, Walfish-Ikegami, Ericsson 9999, entre otros.

Asimismo, para esbozar el desempeño de algunos de los modelos incluidos en la revisión, en comparación entre ellos mismos y/o con valores medidos, en el presente trabajo también se incluyeron los resultados de algunas de esas comparaciones reportadas en la literatura; resultados que indican que el desempeño de un determinado modelo no es único, sino que depende, por ejemplo, de la frecuencia de operación, tipo de ambiente considerado, entre otros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arnau J., Atzeni I. and Kountouris M. (2016). Impact of LOS/NLOS Propagation and Path Loss in Ultra-dense Cellular Networks. 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia.
- [2] Chen J., et al (2014). Measurement-Based LOS/NLOS Channel Modeling for Hot-Spot Urban Scenarios in MTS Networks. International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2014 (Pp. 1-12).
- [3] Almers P., et al (2007). Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol. 2007 (Pp. 1-19).
- [4] Chebil J., Lwas A.K., Islam M.R. and Zyoud A.H. (2011). Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Mobile Communications in the Suburban Area of



Kuala Lumpur. 4th International Conference on Mechatronics (ICOM), Kuala Lumpur, Malaysia.

- [5] Pérez N.A. (2000). Cálculo de Cobertura de Sistemas WLL e LMDS. Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/Rio), Rio de Janeiro, Brasil.
- [6] Pérez N.A. (2003). Modelamento de Efeitos de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres Ponto-a-ponto e Ponto-multiponto. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.
- [7] Crane R.K. (1996). Electromagnetic Wave Propagation through Rain. Wiley-Interscience.
- [8] Levis C., Johnson J.T. and Teixeira F.L. (2010). Radiowave Propagation: Physics and Applications. John Wiley & Sons.
- [9] Jun P. (2014). Research of Radio Channel Characteristics in Mobile Communication Technology. 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), Changsha, China.
- [10] Mullet G. (2005). Wireless Telecommunications Systems and Networks. Cengage Learning.
- [11] Panic S., Stefanovic M., Anastasov J. and Spalevic P. (2013). Fading and Interference Mitigation in Wireless Communications. CRC Press.
- [12] Rappaport, T.S. (2002). Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd Edition, Prentice Hall.
- [13] Misra I.S. (2010). Wireless Communications and Networks: 3G and Beyond. McGraw Hill
- [14] Saunder S.R. and Zavala A.A. (2007). Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- [15] Parsons J.D. (2000). The Mobile Radio Propagation Channel. 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- [16] Maclean J. and Wu G. (1993). Radiowave Propagation over Ground. Springer.
- [17] ITU (International Telecommunications Union) (2013). Recommendation ITU-R P.526-13: Propagation by Difraccion. Ginebra, Suiza.
- [18] Alulema J.A. (2002). Diseño de una Red de Microondas entre Quito - Guayaquil, considerando Análisis de Interferencia y Planeación del Espectro Electromagnético.



Proyecto de Grado, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

- [19] Epstein J. and Peterson D. (1953). An Experimental Study of Wave Propagation at 850 MC. Proceedings of the IRE, Vol. 41, No. 5 (Pp. 595-611).
- [20] Bullington K. (1977). Radio Propagation for Vehicular Communications. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-26, No. 4 (Pp. 295-303).
- [21] Deygout J. (1966). Multiple Knife-edge Diffraction of Microwaves. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-14, No. 4 (Pp. 480-489).
- [22] De Asis M.S. (1971). A Simplified Solution to the Problem of Multiple Diffraction over Rounded Obstacles. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 19, No. 2 (Pp. 292-295).
- [23] Goktas P. (2015). Analysis and Implementation of Prediction Models for the Design of Fixed Terrestrial Point-to-point Systems. Thesis of Master, Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University, Ankara, Turkey.
- [24] Giovaneli C.L. (1984). An Analysis of Simplified Solutions for Multiple Knife-edge Diffraction. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 32, No. 3 (Pp. 297-301).
- [25] Pérez, N., Herrera, J., Uzcátegui, J.R., Peña J.B. (2012), Modelo de Propagación en las Ciudades de Mérida (Venezuela) y Cúcuta (Colombia) para redes WLAN, operando en 2.4 GHz, en Ambientes Exteriores. Revista Universidad, Ciencia y Tecnología, Vol. 16, No. 62 (Pp. 54-64).
- [26] Goldsmith A. (2005). Wireless Communications. Cambridge University Press.
- [27] Hata M. (1980). Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radioservices. IEEE Transactions Vehicular Technology, VT-29, No. 3 (Pp. 317-325).
- [28] Alim M.A., Rahman M.M., Hossain M.M. and Al-Nahid A. (2010) Analysis of Large-Scale Propagation Models for Mobile Communications in Urban Area. International Journal of Computer Science and Information Security, Vol. 7, No. 1 (Pp. 135-139).
- [29] Thomas T. and MV V. (2015). Path loss Determination Using Hata Model and Effect of Path loss in OFDM. International Journal of Advanced Research in Biology, Ecology, Science and Technology (IJARBEST), Vol. 1, No. 8 (Pp. 19-25).
- [30] Molish A.F. (2011). Wireless Communications. 2nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd.
- [31] Mawjoud S. (2013a). Path Loss Propagation Model Prediction for GSM Network Planning. International Journal of Computer Applications, Vol. 84, No. 7 (Pp. 30-33).



- [32] Young W.R. (1952). Comparison of Mobile Radio Transmission at 150, 450, 900 & 3700 mc" [mHz]. Bell System Technical Journal, Vol 31, No. 6 (Pp. 1068-1085).
- [33] Seybold J.S. (2005). Introduction to RF Propagation. John Wiley & Sons.
- [34] Lee W.C.Y. (2006). Mobile Cellular Telecommunications Systems. Third Edition, McGraw Hill.
- [35] Garg V. K. and Wilkes J.E. (1996). Wireless and Personal Communications Systems. Prentice Hall PTR.
- [36] Ramanathan P. (2014). Propagation Path-Loss Prediction Model for 4G Mobile Communication Systems. International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 5, No. 1 (Pp. 410-413).
- [37] Kouyoumjian R. and Prabhakar P. (1974). A Unifm Geometrical Theory of Diffraction for na Edge in a Perfectly Conducting Surface. Proceedings of the IEEE, Vol. 62, No. 11 (Pp. 1448-1461).
- [38] Walfisch J. and Bertoni H.L. (1988). A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 36, No. 12 (Pp. 1788-1796).
- [39] Cátedra M.F. and Pérez-Arriaga J. (1999). Cell Planning for Wireless Communications. Artech House, Inc., Norwood.
- [40] Pedraza L.F., Ballesteros D.M. y Vaca H. (2010). Estudio de Modelos de Propagación en el Entorno de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Revista Visión Electrónica, No. 2 (Pp. 77-87).
- [41] Casaravilla J.M., Dutra G.A., Pignataro N. and Acuña J.E. (2009). Propagation Model for Small Urban Macro Cells. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 7 (Pp. 3094-3101).
- [42] Erceg V., et al. (1999). An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 17, No. 7 (Pp. 1205-1211).
- [43] Erceg. V., et al. (2001). Channel Models for Fixed Wireless Applications IEEE802.16.3c-01/29r4, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. Documento en línea. Disponible en http://www.ieee802.org/16/tg3/contrib/802163c-01_29r4.pdf (Consulta: abril 2016).
- [44] XIRIO Online (2016). Stanford University Interim. Documento en línea. Disponible en <https://www.xirio-online.com/help/es/sui.html> (Consulta: abril 2016).

- [45] Chebil J., Lawas A.K. and Rafiqul-Islam M.D. (2013). Comparison between Measured and Predicted Path Loss for Mobile Communication in Malaysia. World Applied Sciences Journal 21 (Mathematical Applications in Engineering), (Pp. 123-128).
- [46] ECC (Electronic Communication Committee) (2006). The Analysis of the Coexistence of Point-to-multipoint FWS Cells in the 3.4 - 3.8 GHz Band. ECC REPORT 33 - Revised.
- [47] Alam M.D. and Huque-Khan M.R. (2013). Comparative Study of Path Loss Models of WiMAX at 2.5 GHz Frequency Band. International Journal of Future Generation Communication and Networking, Vol. 6, No. 2 (Pp. 11-23).
- [48] Milanovic J., Rimac-Drlje S. and Bejuk K. (2007). Comparison of Propagation Models Accuracy for WiMAX on 3.5 GHz. 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2007), Marrakech, Morocco.
- [49] Kumar P., Patil B. and Ram S. (2015). Selection of Radio Propagation Model for Long Term Evolution (LTE) Network. International Journal of Engineering Research and General Science, Vol. 3, No. 1 (Pp. 373-379).
- [50] Mollel M.S. and Kisangiri M. (2014). Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Mobile Communication. Computer Engineering and Intelligent Systems, Vol. 5, No. 9 (Pp. 1-10).
- [51] Mawjoud S.A. (2013b). Comparison of Propagation Model Accuracy for Long Term Evolution (LTE) Cellular Network. International Journal of Computer Applications, Vol. 79, No. 11 (Pp. 41-45).

BIOGRAFIA DE LOS AUTORES

Katia E. Tirado S.

Es Técnico Profesional en Ingeniería de Sistemas de la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN), Montería, Colombia, en 1999. Es Ingeniera de Sistemas de Información, en la Universidad del Sinú, Montería, Colombia, en 2005. Realizó un Diplomado en Docencia Universitaria con énfasis en Competencias, en la Corporación de Orientación Educativa (COE), Montería, en 2007. Es candidata a Especialista en Redes y Telecomunicaciones, Universidad del Sinú.

John J. Muñoz S.

Técnico Profesional Ingeniería de Sistemas de la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN), Montería, Colombia, en 2002. Ingeniero Informático, en la Fundación Universitaria Católica del Norte, Santa Rosa de Osos, Antioquia, Colombia, en 2007. Es candidato a Especialista en Redes y Telecomunicaciones, Universidad del Sinú.
