

## ESTUDIO DE MODELOS DE PROPAGACIÓN EN EL ENTORNO DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

### MODEL STUDY OF SPREAD IN THE ENVIRONMENT OF THE UNIVERSITY DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

LUIS FERNANDO PEDRAZA<sup>1</sup>  
DORA M. BALLESTEROS<sup>2</sup>  
HAROLD VACA<sup>3</sup>

RECIBIDO: JULIO 2010  
APROBADO: OCTUBRE 2010

#### RESUMEN

en el presente documento se dan a conocer tres de los diferentes modelos de propagación en entornos urbanos, adaptados al entorno de la universidad, y se analizan las pérdidas de propagación de cada uno de ellos con respecto a la estación base (La Magdalena), que es la que tiene mejor cobertura en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en Bogotá (Colombia). Se verifica que la potencia de recepción, tomada en diferentes puntos de la universidad (con un teléfono celular y su respectivo GPS), es mayor que la sensibilidad, y se evalúan estos datos con los obtenidos por cada modelo.

#### Palabras clave

cobertura, estación base, propagación, pérdidas, sensibilidad

respective LG and GPS) is greater than the sensitivity and evaluate these data with those obtained by each model.

#### Abstract

In this paper we explain three different propagation models in urban environments that adapt to the college environment, and discusses the propagation loss of each of them with respect to the base station (the Magdalena), since this is the one that has better coverage in the University District of Colombia. It verifies that the received power taken at different points in college (with a

#### Key words

coverage, base station, propagation, loss, gain

#### 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de propagación de radiofrecuencia surgen de la necesidad de modelar una zona geográfica de terreno irregular,

1. Ingeniero electrónico. Msc en Teleinformática. Docente de planta, Universidad Distrital. Correo electrónico: lfpedrazam@udistrital.edu.co

2. Ingeniera electrónica. Msc. en Ingeniería Electrónica y de Computadores. Docente de planta, Universidad Militar Nueva Granada. Correo electrónico: dora.ballesteros@unimilitar.edu.co

3. Licenciado en Matemática. Msc (c) en Matemática Aplicada. Docente de planta, Universidad Distrital. Correo electrónico: hvacca@udistrital.edu.co

para así poder predecir las pérdidas a través del camino hacia el móvil (*path loss*). En este sentido, existe una gran cantidad de factores que se deben tener en cuenta, entre otros:

- Un perfil del terreno de la zona a modelar (zona de cobertura).
- Presencia de obstáculos como edificios, árboles, etc.

Para este fin, a lo largo de la historia reciente, muchos científicos han propuesto diversos modelos, los cuales apuntan a predecir la potencia de la señal en un punto específico de recepción dentro de un área. Estos modelos varían en su enfoque, complejidad y precisión, pero en su mayoría están basados en la interpretación de mediciones en diversos tipos de áreas de servicios, [1].

Alrededor de este tema se han escrito varios artículos [2], [3] y [4]; sin embargo, la mayoría se enfocan a un tipo de ambiente en especial, ya sea urbano, rural o afectado por montañas. En [2] se realiza un modelo de propagación para sistemas inalámbricos que permite predecir y describir la forma como la señal de potencia se transmite y se recibe a una determinada distancia, mediante la utilización de técnicas de regresión de modelos de estimación y métodos estadísticos aplicados en tres tipos de ambientes: urbano, semi-urbano y rural. Gran parte de los datos obtenidos para el diseño se tomaron en Colombia: la ciudad de Cúcuta y en una finca en la vía a Pamplona (Norte de Santander). En [3] para la región Andina se desarrolla un algoritmo que considera la influencia del relieve en la propagación electromagnética para un entorno semiurbano sobre terreno montañoso, trabajando en la banda de UHF (300MHz-3GHz), utilizada en los actuales y futuros sistemas de

comunicación inalámbricos. El modelo base, el COST231-Walfisch-Ikegami, utilizado en la investigación, demostró beneficios, junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las Herramientas de Planificación, para el desarrollo de los estudios de propagación, estimación de coberturas y análisis de los principales factores que afectan la planificación de un sistema móvil celular. En [4] se plantean los diferentes modelos de propagación, comportamiento y su desempeño en comunicaciones móviles que se aplican para la zona geográfica de Caldas.

El trabajo presentado en [5] muestra el importante efecto del modelado de interiores y exteriores de los edificios de la Universidad de Liverpool, a frecuencias de 900, 1.800 y 2.300 Mhz, así como los resultados de las medidas cuando dentro de un mismo edificio están situados el transmisor y el receptor. El trabajo de [6] resulta similar. Allí se analiza una serie de experimentos sobre las pérdidas de penetración de radio, dirigidos en Boulder y Denver sobre edificios. A continuación se presentan los modelos de propagación usados para el análisis del entorno; luego se muestran los resultados de estos en el entorno; y finalmente, se evalúan los resultados obtenidos.

## 2. MODELOS DE PROPAGACIÓN

Los modelos que se presentan a continuación son elegidos para la realización de este estudio, [9], ya que sus parámetros del ambiente urbano, como son las alturas de los edificios, el ancho de las vías, la separación entre los edificios, etc., son viables para el tipo de entorno de la Universidad Distrital; por lo tanto, la estimación de pérdidas por trayectoria de cada modelo en particular se hace más predecible.

## 2.1. Modelo Okumura-Hata

Es una formulación empírica de los datos de las pérdidas de propagación provistos por Okumura, y es válido en el rango de VHF y UHF de los 150 a los 1.500 Mhz. Aunque presenta las pérdidas dentro de un área urbana como una fórmula estándar, este modelo es utilizado para predecir la potencia en un receptor ubicado en un área urbana para comunicaciones móviles [1].

Tomando en cuenta que:

$$L(dB) = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \cdot \log(d)$$

$$30m \langle h_{te} \langle 200m \quad 150Mhz \langle f_c \langle 1500Mhz$$

$$1m \langle h_{re} \langle 10m$$

$$1km \langle d \langle 20km$$

(1)

Se debe considerar que las definiciones son las mismas que para el modelo Okumura, incluyendo:

$f_c$  : frecuencia portadora [Mhz]

$h_{te}$  : altura de antena Tx en [m] rango de 30 a 200 mts.

$h_{re}$  : altura antena receptora en [m] rango de 1 a 10 mts.

$a(h_{re})$  : factor de corrección para la altura de la antena móvil que es función del tipo de área de servicio.

$d$  : distancia entre el transmisor y el receptor [km.].

Como se puede observar, involucra una nueva variable que es el factor de corrección de la antena móvil, el cual se define según sea el tamaño de la ciudad; para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log f_c - 0.7)h_{re} - (1.56 \log f_c - 0.8) \text{ dB}$$

(2a)

Para ciudades grandes:

$$a(h_{re}) = 8.29(1.1 \log 1.54h_{re})^2 - 1.1 \text{ dB para } f_c \langle 300 \text{ Mhz}$$

(2b)

$$a(h_{re}) = 3.2(\log 11.75h_{re})^2 - 4.97 \text{ dB para } f_c \rangle 300 \text{ Mhz}$$

(2c)

## 2.2. MODELO COST 231

La Cooperativa Europea para Investigación Científica y Técnica (Euro-Cost) desarrolló el modelo Cost 231, en el cual se extiende el modelo Hata hasta el rango de los 2 Ghz, cubriendo la banda de VHF y UHF. El modelo se expresa como:

$$L(dB) = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log h_{te}) \cdot \log(d) + C_M$$

(3)

donde  $C_M$  es un factor de corrección para adecuar el modelo extendiendo el rango de frecuencia para el que opera el modelo Hata;  $C_M = 0$  dB para ciudades medianas y áreas suburbanas;  $C_M = 3$  dB para centros metropolitanos; y  $a(h_{re}) =$  corresponde a las ecuaciones presentadas en el modelo de Hata.

Una de las aportaciones de este modelo es considerar pérdidas por dispersión. Se define también en el siguiente rango:

$$f = 1500Mhz \text{ a } 2000Mhz$$

$$h_{te} = 30m \text{ a } 200m$$

$$h_{re} = 1m \text{ a } 10m$$

$$d = 1km \text{ a } 20km$$

### 2.3. MODELO SIMPLIFICADO DE XIA-BERTONI

En la figura 1 se observa el entorno de propagación considerado para el modelo Xia-Bertoni; se puede apreciar cómo los edificios, en fila, están separados entre sí a una distancia constante ( $w$ ) y situados a la misma altura. Se considera que este modelo de propagación está basado en teoría de rayos y óptica geométrica; no tiene en cuenta la orientación de la calle; y considera la influencia de estructuras cercanas a la base [7].

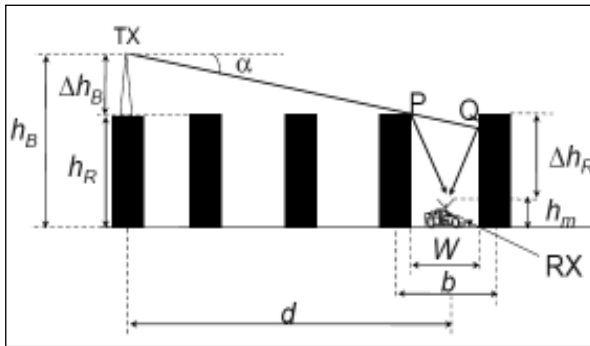


Figura. 1. Geometría del modeló Xia-Bertoni (simplificado)

La pérdida por trayectoria " $L_b$ " se modela como la suma de tres factores:

$$L_b = L_o + L_{rts} + L_{smd} \quad (4)$$

La ecuación (4), puede expresarse desde tres casos diferentes así:

Antena de la base por encima del nivel medio de edificios  $h_B \gg h_R$ .

Antena de la base próxima al nivel medio de los edificios  $h_B \approx h_R$ .

Antena de la base por debajo del nivel medio de los edificios  $h_B < h_R$ .

Las pérdidas en espacio libre ( $L_o$ ) se calculan:

Caso 1:  $h_B \gg h_R$

$$L_o = -10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (5)$$

Caso 2:  $h_B \approx h_R$  y  $h_B < h_R$ . Corrección adicional de 3 dB para considerar la dispersión local por obstáculos cercanos a la base.

$$L_o = -10 \log \left( \frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi d} \right)^2 \quad (6)$$

donde ( $d$ ) es la distancia horizontal ente el TX y el RX.

Las pérdidas por difracción tejado-calle ( $L_{rts}$ ) se calculan en los tres casos de la misma forma:

$$L_{rts} = -10 \log \left[ \frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] \quad (7)$$

donde,

$$\theta = \arctg \left( \frac{|\Delta h_R|}{X} \right) \quad (8)$$

$$r = \sqrt{(\Delta h_R)^2 + X^2} \quad (9)$$

$$|\Delta h_R| = h_R - h_m$$

(10)

( $X$ ) Es la distancia horizontal entre el móvil y la arista difractante del tejado. Se suele tomar  $X = \frac{W}{2}$  (móvil en el centro de la calle).

Las pérdidas por difracción multipantalla ( $L_{msd}$ ) se calculan:

Caso 1:  $h_B \gg h_R$

$$L_{msd} = -10 \log \left[ 5.5225 \cdot \left( \frac{\Delta h_B}{d} \cdot \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{1.8} \right]$$

(11)

Caso 2:  $h_B \approx h_R$

$$L_{msd} = -10 \log \left( \frac{b}{\lambda} \right)^2$$

(12)

Caso 3:  $h_B < h_R$

$$L_{msd} = -10 \log \left[ \left( \frac{b}{2\pi(d-b)} \right)^2 \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{(\Delta h_B)^2 + b^2}} \cdot \frac{1}{\Phi} - \left( \frac{1}{2\pi + \Phi} \right)^2 \right]$$

(13)

donde ( $b$ ) es la separación media de edificios.

$$\Phi = -\arctg \left( \frac{\Delta h_B}{b} \right)$$

(14)

### 3. ENTORNO DE EVALUACIÓN

Para el desarrollo del presente documento se siguieron ciertos parámetros y consideraciones que al final del proceso permitieron obtener resultados fácilmente evaluables. En primer lugar, fue necesario tomar ocho sitios alrededor de la Universidad, como se observa en la figura 2, los cuales fueron ubicados en el *software* Google Earth para determinar las mediciones de las distancias en cada punto respecto a la estación base (BTS) de La Magdalena.



Figura 2. Ubicación de lugares por software Google Earth

Los diferentes puntos son enmarcados de 1 a 8, siendo 1 el más cercano a la BTS y 8 el más lejano (ver tabla 1).

Puntos	Distancia (d) BTS-Movil	Latitud(N)	Longitud(O)
BTS	-	4°37'36.27"	74°04'08.15"
1: Esquina Tesoreria	63,25 mts	4°37'36.27"	74°04'08.15"
2: Mitad de la Cancha	87,44 mts	4°37'34.89"	74°04'08.84"
3: Entrada Coopadea	96,31 mts	4°37'34.71"	74°04'10.94"
4:Paraninfo	102,26 mts	4°37'34.27"	74°04'09.57"
5:Entrada UCC	118,45 mts	4°37'33.96"	74°04'08.44"
6:Ent. Bibli. Derecho	123,69 mts	4°37'33.60"	74°04'09.22"
7:Ent.Edificio Idiomas	158,7 mts	4°37'32.43"	74°04'09.87"
8:Salida UCC	160,32 mts	4°37'32.48"	74°04'08.68"

Tabla 1. Distancias de la BTS al móvil

Para medir la potencia de recepción en los diferentes lugares se utilizó un celular LG®, como se observa en la figura 3, el cual indicó el canal correspondiente al que se encontraba conectado el móvil, que en este caso corresponde a la banda GSM-850, canal 135, sector (Y) de la BTS (La Magdalena), que pertenece al operador Comcel®.

Con el objetivo de obtener resultados útiles para la ejecución de comparaciones con otros modelos de propagación, en los sitios se realizó un promedio de cinco muestras de los niveles de potencia de recepción con la BTS, como se ve en la tabla 2.

Usando las ecuaciones (1), (3) y (4) se hallan las pérdidas de cada modelo de propagación, con las siguientes medidas: altura de la antena de la BTS 30 metros, altura de la antena del móvil 1,5 metros, y altura promedio de los edificios alrededor de la universidad 20 metros. Por último, reemplazando en la ecuación de Friis (15) se obtiene la Prx de cada uno de los modelos.

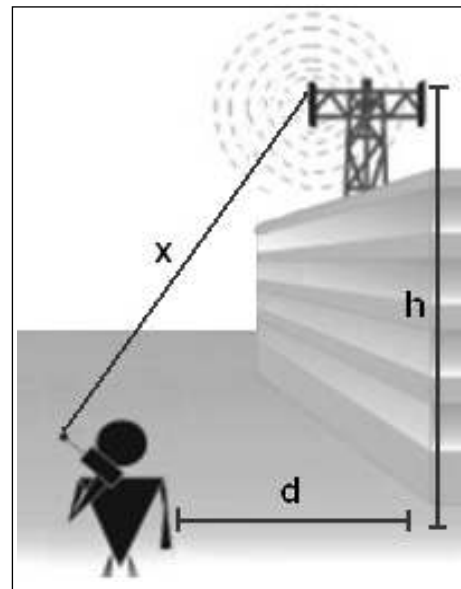


Figura 3. Diagrama de la BTS al móvil

$$P_{RX} \Big|_{dBm} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_P - Md \tag{15}$$

Siendo :

$P_{RX}$  = potencia de recepción (dBm)

$P_{TX}$  = potencia de transmisión (dBm)

$G_{TX}$  = ganancia de antena BTS (dBi)

$G_{RX}$  = ganancia de antena móvil (dBi)

$L_p$  = Pérdidas por propagación (dB)

$Md$  = margen de desvanecimiento (dB)

Puntos	X (mts)	Potencia RX (dBm)
1	70,00	-57,6
2	92,44	-50,6
3	100,87	-61,6
4	106,57	-59,8
5	122,19	-55
6	127,28	-53,8
7	161,51	-47
8	163,10	-60,8

Tabla 2. Potencia de recepción en cada punto

Con la figura 4 se puede estimar Md a partir de la potencia recibida en un móvil en la ciudad de San Francisco; se ilustra uno de los peores casos de dispersión multicamino registrado en un sistema celular. Esta figura indica que la energía de multicamino se encuentra 18 dB por debajo de la primera señal que llega, e incurrió en 100  $\mu$ s de re-

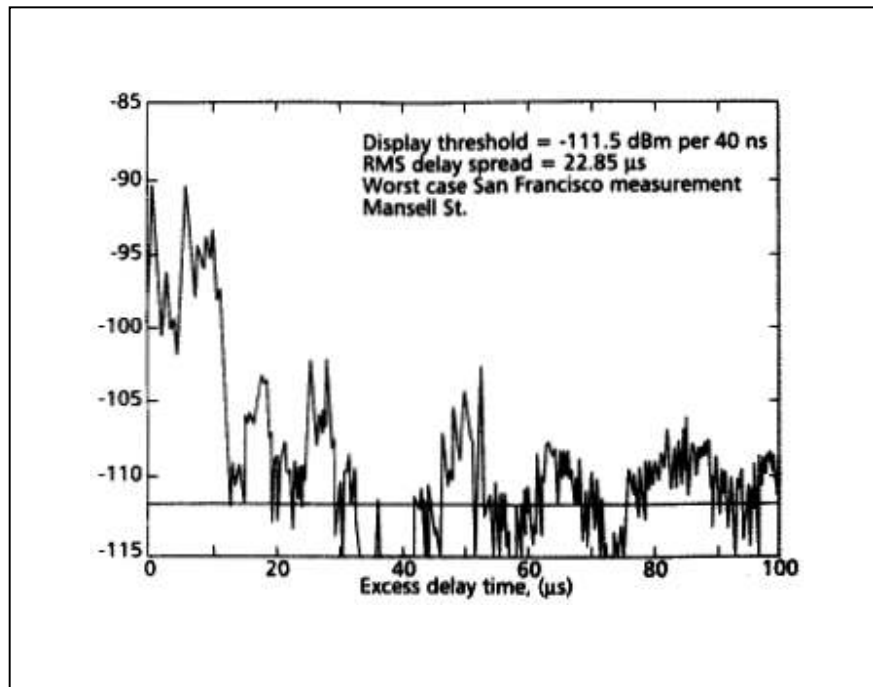


Figura. 4. Potencia recibida en un móvil, medida realizada en San Francisco - California

tardo de propagación. En sistemas celulares típicos urbanos, los peores excesos de retraso (en niveles de probabilidad del 99%) son de 10 dB de la señal máxima [8].

En la figura 4 la gran mayoría de desvanecimientos de pequeña escala están en el intervalo de 10 dB. Si no se compensan estas variaciones, es posible que se pierda la comunicación. Con un Md de 10 dB se compensa este desvanecimiento.

Los datos de la BTS (La Magdalena) y el móvil son los siguientes:

Ganancia BTS a 850 Mhz: 17 dBi.

Ganancia móvil: 0,5 dBi.

Sensibilidad del móvil: -102 dBm.

Potencia mínima de Tx: 13 dBm.

Potencia máxima de Tx: 33 dBm.

Salto: +2 dB.

Radio de cobertura: 1,10 km.

#### 4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la tabla 3 se muestran las pérdidas de propagación que se logran con las fórmulas de cada modelo, y su respectiva gráfica se observa en la figura 5, en donde el modelo Xia-Bertoni presenta unas pérdidas bajas, en comparación con otros modelos; se puede afirmar que hay una diferencia de aproximadamente 10 a 19 dB, debido a las características de los modelos y a las variaciones del terreno

Puntos	Perdidas L(dB)		
	M. Hata	M. Cost 231	M. Xia-Bertoni
1	83,538	85,962	73,678
2	88,493	90,916	76,491
3	89,971	92,394	77,330
4	90,888	93,311	77,850
5	93,136	95,560	79,127
6	93,798	96,222	79,503
7	97,611	100,035	81,668
8	97,767	100,190	81,756

Tabla 3. Perdidas por propagación de los distintos modelos de propagación

Los resultados de la potencia de recepción para los distintos modelos de propagación en el entorno de la universidad se muestran en la tabla 4. Comparado con los resultados de las mediciones realizadas en los ocho puntos escogidos, el modelo Xia-Bertoni (simplificado) se aproxima a la potencia tomada con el móvil y en un grado menor para los modelos Okumura-Hata y Cost 231. Dado que las mediciones se llevaron a cabo siguiendo la consideración del terreno, se utilizaron las medidas de la separación media de edificios ( $b$ ) y el ancho de las calles ( $w$ ). De forma

similar, en la figura 6 se observa la potencia de recepción con respecto a la distancia. En este caso se puede afirmar que en el modelo Xia-Bertoni se obtuvo un resultado aceptable, independientemente de la variabilidad del terreno, tal y como se corrobora con los datos obtenidos en la tabla 5. Solamente en condiciones en las cuales los cambios en la altura del terreno son muy pequeños comparados con el promedio de altura de los edificios, como es el caso del punto 7, la potencia de recepción del celular con relación al modelo Xia-Bertoni tiene un desfase de 10

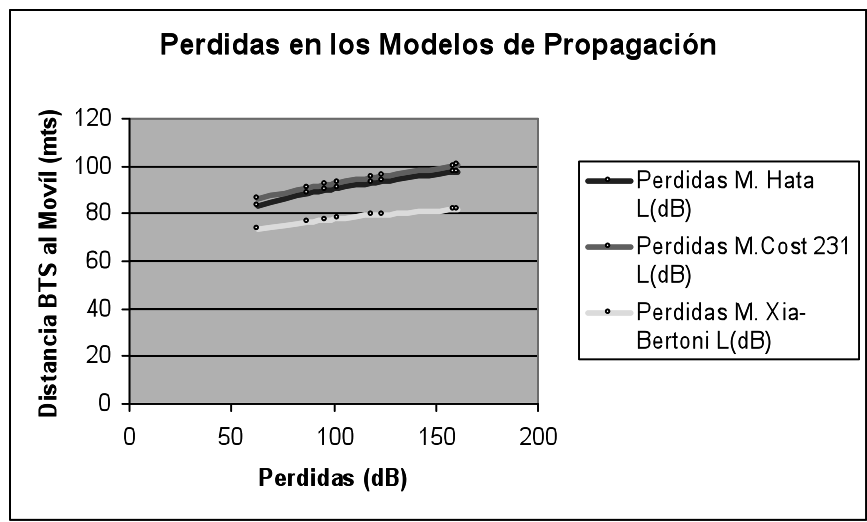


Figura 5. Grafica de pérdidas de los modelos propagación



Potencia Medida (Celular) Rx (dBm)	Modelo Hata (Okumura-Hata) Rx (dBm)	Modelo Cost 231 (Extensión Hata) Rx (dBm)	Modelo Xia-Bertoni (Simplificado) Rx (dBm)
-57,6	-61,038	-63,462	-51,178
-50,6	-65,993	-68,416	-53,991
-61,6	-67,471	-69,894	-54,830
-59,8	-68,388	-70,811	-55,350
-55	-68,636	-71,060	-54,627
-53,8	-69,298	-71,722	-55,003
-47	-73,111	-75,535	-57,168
-60,8	-73,267	-75,690	-57,256

Tabla 4. Potencia de recepción con los distintos modelos de propagación

dBm. De este modo, se puede apreciar que el comportamiento del modelo Xia-Bertoni, si se lo compara con otros modelos, se encuentra dentro de los márgenes aceptables y sigue de forma más aproximada al comportamiento de las potencias de recepción medidas con el móvil.

A partir de la tabla 5 se puede afirmar que el modelo que más se ajusta al entorno de la universidad es el modelo Xia-Bertoni, ya que presenta el menor valor de desviación estándar, el menor error cuadrático medio,

y aunque el valor del coeficiente de correlación no es bueno, pues indica que la variable distancia explica apenas en un 15,25% la variable pérdidas, es el mejor entre los tres modelos, ya que los modelos Okumura-Hata y Cost 231 en el análisis de la correlación obtuvieron valores negativos, por lo que se puede deducir que es una correlación débil; es decir, sus valores son muy diferentes. El signo negativo demuestra que la correlación es inversa; esto indica que al aumentar una de las potencias la otra disminuye.

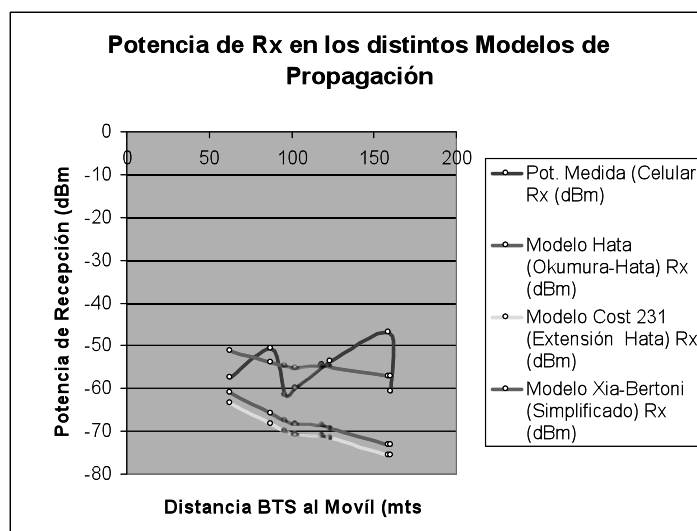


Fig. 6. Potencia de recepción (dBm) Vr. Distancia (mts), de cada modelo de propagación

**5. CONCLUSIONES**

Este artículo contiene los resultados de tres modelos de propagación en el entorno de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, que correlacionados con mediciones estadísticas permiten predecir la forma como la señal de potencia se recibe a determinada distancia, pero considerando las variaciones de potencia en el receptor bajo un escenario óptimo. En los diferentes modelos se presentan los problemas de valores muy altos o muy bajos de potencia de recepción, por efectos de la propagación de la señal. No se obtuvieron buenos resultados en los modelos de propagación Okumura-Hata y Cost 231; este último presentó el mayor margen de error para las correspondientes potencias de recepción y sus pérdidas.

Con respecto a la obtención de las pérdidas en los diferentes modelos, es notable encontrar ciertos cambios, pero con la particularidad de que los modelos Okumura-Hata y Cost 231 tienen la tendencia a parecerse en sus resultados. Lo contrario sucede con el modelo Xia-Bertoni, en donde las pérdidas tienden a ser más bajas y alejadas de los otros dos modelos, como se observa en la tabla 4 y en la figura 6.

El método Xia-Bertoni requiere una gran gama de medidas, teniendo en cuenta la va-

Estadística	Pot. Medida Vs. Hata	Pot. Medida Vs. Cost 231	Pot. Medida Vs. Xia-Bertoni
<b>Coefficiente de Correlacion</b>	-0,17824	-0,17824	-0,12610
<b>Desviacion Estandar</b>	7,88319	8,94600	3,79077

Tabla 5. Coeficientes de correlación y desviación estándar de cada modelo de propagación

riación de la altura de los edificios, la distancia horizontal entre el móvil y la arista difractante del tejado y la separación de edificios, entre otros factores. Una de las ventajas de este método es que no tiene en cuenta la orientación de la calle, lo que permite un uso sencillo y rápido de las respectivas ecuaciones.

**REFERENCIAS**

- [1] J.D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*. England: Wiley, 2000.
- [2] J.E. Herrera y N.A. Pérez, “Modelo de propagación en ambientes exteriores para sistemas inalámbricos operando en la banda de frecuencias de 2.4 Ghz”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, Universidad de Pamplona, 1998.
- [3] A.P. García, H. Ortega, A. Navarro y A.H. Rodríguez, “Efectos del terreno en la propagación electromagnética en entornos urbanos sobre la región Andina, usando el modelo COST 231-Walfisch-Ikegami y herramientas de planificación basadas en GIS”. *Sistemas & Telemática*, vol. 1, Universidad ICESI, 2003.
- [4] J.C. García, O.A. Rodríguez y J.L. Castillo, “Desempeño de modelos de propagación en comunicación móvil para la zona de Caldas, parte 1: modelos para áreas urbanas”. *X Congreso Internacional de Telecomunicaciones*, Valdivia, Chile, 2002.
- [5] A.F. de Toledo, M.D. Turkmani y J.D. Parsons, “Estimating Coverage of Radio Transmission into and within Build-

- dings at 900, 1800, and 2300 Mhz”. IEEE Personal Communications, 1998.
- [6] S. Aguirre, L.H. Loew e Y. Lo, “Radio Propagation Into Buildings at 912, 1920, and 5990 MHz Using Micro-cells”. Proc. 3rd IEEE ICUPC, 1994.
- [7] J.M. Hernando, Comunicaciones móviles. España: Centro de Estudios Ramón Areces, 1997.
- [8] J.B. Andersen, T.S. Rappaport y S. Yoshida, “Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels”. IEEE Communications Magazine, 1995.
- [9] Recommendation ITU-R P.1411-4, Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz. Consultado el 2 de septiembre de 2010 en: <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/P/R-REC-P.1411-4-200708-I!!PDF-E.pdf>.