

# Análisis de cobertura de las técnicas de modulación y codificación en redes inalámbricas basadas en IEEE 802.16

Ángel Alcaraz-Chávez  
Juanita Nancy Mondragón-Medina  
Carlos Enrique García-García  
José Ernesto Rojas-Lima

Instituto Politécnico Nacional,  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
Departamento de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica,  
Academia de Comunicaciones.  
Av. Instituto Politécnico Nacional s/n,  
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos",  
Col. Lindavista,  
México, DF, CP 07738.  
MÉXICO.

correo electrónico (email): nmondragon@ipn.mx  
cegarciag@ipn.mx  
errojas@ipn.mx

Recibido 06-10-2011, aceptado 09-04-2012.

## Resumen

Este artículo presenta una predicción de las distancias de cobertura de los esquemas de modulación y codificación (perfiles de ráfaga) empleados en las redes WiMAX basadas en el estándar IEEE 802.16-d. Se consideran dos casos de estudio, uno sin desvanecimientos y otro con desvanecimientos. Para el caso sin desvanecimientos, se evalúan diferentes tipos de terreno de acuerdo a los modelos de propagación SUI IEEE 802.16 para predecir las pérdidas por trayectoria y la potencia recibida a una distancia dada entre la estación base y el usuario. En el caso con desvanecimiento se calcula, además, un margen de desvanecimiento para garantizar un porcentaje del área de cobertura de los perfiles de ráfaga para un terreno tipo Ciudad de México. A partir de este análisis, será posible establecer algoritmos de adaptación al enlace que consideren la posición de los usuarios respecto a la estación base, en un ambiente de una sola celda.

**Palabras clave:** IEEE 802.16-d, modulación y codificación adaptable, adaptación al enlace, perfiles de ráfaga, WiMAX, desvanecimientos, margen de desvanecimientos.

**Abstract**  
**(Coverage Analysis of the Modulation and Coding Techniques for Wireless Networks Based on IEEE 802.16)**

This paper presents a prediction of the coverage distances regarding the modulation and coding schemes used in WiMAX networks based on the IEEE 802.16-d standard. We analyze two cases. The first one considers propagation path losses without shadow fading in which different terrain types according to the SUI IEEE 802.16 propagation models are applied to calculate the received power at a given distance between the base station and the user. In the second case, the effect of shadowing is included in order to evaluate the fade margin required for a given coverage probability of the modulation and coding schemes, considering a México City terrain type. According to this analysis, it will be possible to define link adaptation algorithms that consider the position between the users and the base station in a single cell environment.

**Key words:** IEEE 802.16-d, adaptive coding and modulation, link adaptation, burst profiles, WiMAX, fading, fade margin.

## 1. Introducción

En años recientes, la progresiva demanda de servicios de altas tasas de datos, aplicaciones multimedia, alta calidad de la información, ha generado nuevos desafíos para el acceso de banda ancha. Debido a esta razón las comunicaciones inalámbricas están ampliando sus campos de acción, permitiendo obtener funcionamientos comparables a las soluciones cableadas, pero con menores costos de infraestructura e implantación de las redes.

Bajo este razonamiento, surge la *interoperabilidad mundial* para el acceso por microondas (WiMAX: *Worldwide Interoperability for Microwave Access*), basada en el estándar IEEE 802.16, la cual es una tecnología de última milla que puede ser utilizada como una alternativa viable y atractiva

para satisfacer estas demandas. El estándar IEEE 802.16 está orientado a las *redes inalámbricas de área metropolitana* (WMAN: *Wireless Metropolitan Area Network*), operando primordialmente en dos capas del modelo OSI (OSI: *Open System Interconnection*), la *capa física* (PHY: *Physical*) y la *capa de control de acceso al medio* (MAC: *Medium Access Control*) [1] [2].

Las diversas versiones del estándar IEEE 802.16 se describen a continuación: la versión original del estándar IEEE 802.16 define los protocolos de la capa MAC y la capa PHY para frecuencias de 10-66 GHz operando en condiciones de *línea de vista* (LOS: *Line Of Sight*) para conexiones punto a multipunto. La versión IEEE 802.16a se enfocó en bandas de más baja frecuencia en la gama de 2 a 11 GHz, lo cual permitió operar en condiciones *sin línea de vista* (NLOS: *Non-Line Of Sight*), en la capa PHY adiciona esquemas como el *multiplexaje por división ortogonal de frecuencia* (OFDM: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y en la capa MAC se incluye el soporte a la técnica de *acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales* (OFDMA: *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) [2]. El estándar IEEE 802.16c mejoró las capacidades sobre la banda de los 10 GHz a los 66 GHz, este estándar se utilizó como base para la definición de la *red de área metropolitana de alto desempeño* (HiperMAN: *Hiper Metropolitan Area Network*). La versión IEEE 802.16-2004 denominada también como WiMAX fijo introdujo algunas mejoras para el enlace de subida, incluye *sistemas de antenas de entradas múltiples, salidas múltiples* (MIMO: *Multiple Input Multiple Output*), *sistemas de antenas avanzadas* (AAS: *Advanced Antenna System*), *utiliza modulación y codificación adaptable* (AMC: *Adaptive Modulation and Coding*), provee diferentes niveles de *calidad de servicio* (QoS: *Quality of Service*), proporcionando grandes coberturas, para ambientes LOS hasta 50 km y para ambientes NLOS hasta 8 km con una velocidad de 75 Mbps. La versión IEEE 802.16e-2005 incorpora la funcionalidad que permite movilidad, portabilidad, además de soportar la transferencia automática del enlace "handover" o "handoff", esta versión incluye la especificación de la técnica OFDM *escalable* (SOFDM: *Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para la capa PHY y algunas adaptaciones para el acceso al medio de alta velocidad en movimiento de la capa MAC, además de desarrollar un modo de ahorro de potencia utilizando modos de espera e inactividad. La versión IEEE 802.16f define una *base para la gestión de información* (MIB: *Management Information Base*) para la capa PHY y MAC, la cual consiste en un *sistema de gestión de red* (NMS: *Network Management System*) que se encarga de gestionar nodos y proporcionar un flujo de servicios para dicha base de datos [3]. La versión IEEE 802.16j soporta una arquitectura de

*relevos móviles por saltos múltiples* (MMR: *Mobile Multi-Hop Relay*), agregando *estaciones de relevo* (RS: *Relay Stations*), las cuales ayudan a la *estación base* (BS: *Base Station*) a comunicarse con las *estaciones móviles* (MS: *Mobile Station*) que se encuentran muy alejadas de la BS, esto nos ayuda a mejorar la QoS, extender y mejorar la capacidad de la red, de igual manera describe una técnica llamada "tuneleo" para soportar la agregación de RS, para administrar o transportar el tráfico agregado [4]. El estándar IEEE 802.16m, también conocido como WiMAX 2.0, terminado a finales del año 2010, es fuerte candidato para la interface de radio del estándar para las *telecomunicaciones móviles internacionales avanzadas* (IMT-Advanced: *International Mobile Telecommunications-Advanced*), el cual define los requerimientos establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU: *International Telecommunication Union*) para 4G, esta versión ofrece las siguientes mejoras: mayor eficiencia espectral para MIMO, mayor tasa de datos de los usuarios soportando portadoras con diferentes anchos de banda, mayor capacidad para datos y VoIP (*Voice Over Internet Protocol*), menor latencia, aumento en la QoS, mayor cobertura en entornos de alta interferencia mejorando el control del canal, soporte para una mayor movilidad, mejoras en el funcionamiento de ahorro de energía, soporte para la integración de relevos por multisaltos y femtoceldas, tasas de datos de hasta 100 Mbps para conexiones móviles y 1 Gbps para conexiones fijas, optimización para mejorar la interoperabilidad y la coexistencia con otras tecnologías tales como sistemas 3G, Wi-Fi y Bluetooth [5][6][7].

Este trabajo está basado en el estándar IEEE 802.16-d, definido para el acceso inalámbrico de banda ancha fijo, donde el enfoque principal es realizar el cálculo de las distancias de cobertura alcanzadas por cada perfil de ráfaga, con el propósito de deducir los porcentajes del área de cobertura que presenta cada uno de ellos en toda la celda, evaluando cuatro tipos de terreno, comparando el terreno con más adversidades de propagación y el terreno tipo Ciudad de México, tomando dos casos de estudio; uno sin considerar los desvanecimientos y otro considerando a éstos, enfocándonos de manera más profunda en el terreno tipo Ciudad de México, con la finalidad de analizar el comportamiento de la señal transmitida en toda la celda, y observar su comportamiento, así con base en el razonamiento anterior, establecer mecanismos de adaptación al enlace, ya que es importante mencionar que en el estándar IEEE 802.16-d no se encuentran definidos estos mecanismos, por lo que su implantación se deja a criterio del operador o administrador del sistema.

Las aportaciones de este trabajo se centran principalmente en el análisis de propagación, considerando los desvaneci-

mientos que experimenta la señal en la zona norte de la Ciudad de México, en un ambiente de una sola celda para un radio de 1 km, además de calcular los porcentajes del área cobertura de los esquemas de modulación y codificación, empleados en las redes WiMAX basadas en el estándar IEEE 802.16-d, cuya finalidad es establecer un mecanismo de adaptación al enlace que garantice una buena cobertura y confiabilidad en toda la celda, con base en los parámetros anteriormente deducidos.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2, mostramos la revisión de las técnicas de modulación y codificación en el estándar IEEE 802.16. En la sección 3, presentamos el modelo de evaluación utilizado. En la sección 4, mostramos los resultados obtenidos y finalmente en la sección 5, se presentan las conclusiones y se plantea parte del trabajo futuro.

## 2. Revisión de las técnicas de modulación y codificación en el estándar IEEE 802.16

Los sistemas inalámbricos basados en el estándar IEEE 802.16 utilizan esquemas de modulación y codificación con el objetivo de transmitir altas tasas de datos cuando la calidad del canal es buena y transmitir una tasa de datos más baja cuando la calidad del canal es pobre, a lo cual se le denomina adaptación al enlace [2][8].

A la combinación de los esquemas de modulación y codificación se les denomina perfiles de ráfaga (*Burst Profiles*) [2].

En el caso del estándar IEEE 802.16-d se definen siete perfiles de ráfaga dentro de su capa PHY mostrados en la tabla 1, dichos perfiles están en función de la tasa de datos, potencia mínima requerida o sensibilidad  $S_{min}$ , y la razón de codificación [9][10].

**Tabla 1.** Perfiles de ráfaga en el estándar IEEE 802.16-d.

Perfil de ráfaga	Modulación	Razón de codificación $R_c$	$S_{min}$ [dBm]	Tasa de datos [Mbps]
1	BPSK	1/2	-83.05	6.91
2	QPSK	1/2	-80.05	13.82
3	QPSK	3/4	-78.25	20.74
4	16-QAM	1/2	-73.05	27.65
5	16-QAM	3/4	-71.25	41.47
6	64-QAM	2/3	-66.25	55.30
7	64-QAM	3/4	-65.05	62.21

La elección de los diferentes perfiles de ráfaga de acuerdo a las condiciones del canal tiene como finalidad proporcionar una tasa de datos promedio óptima, esto se logra utilizando técnicas de *modulación y codificación adaptable*.

Cabe mencionar que dentro de la capa física del estándar IEEE 802.16-d no se encuentran definidos los mecanismos de adaptación al enlace, por lo que la forma y desarrollo de éstos se dejan a criterio del operador del sistema [9].

## 3. Modelo de evaluación

### A. Consideraciones generales

Propusimos una celda circular con un radio de 1 km, en cuyo centro se localiza una antena omnidireccional, montada en una torre con una altura  $h_{Tx} = 30$  m, la antena opera en condiciones NLOS, el ancho de banda es de 7 MHz y la frecuencia de operación es de 3.5 GHz [11].

### B. Modelo de propagación

Empleamos los modelos SUI (*Stanford University Interim*) IEEE 802.16, para evaluar de forma precisa las características de propagación en el medio inalámbrico, los cuales han sido aprobados para frecuencias por debajo de los 11 GHz [12].

Las pérdidas debido a la trayectoria de propagación de los modelos SUI están dadas por la siguiente ecuación [11]:

$$L_p = A + 10\gamma \log \frac{d}{d_0} + X_f + X_h + X \quad \text{para } d > d_0 \quad (1)$$

Donde  $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor en metros,  $d_0$  es una distancia de referencia igual a 100 m, el factor  $A$  representa las pérdidas en el espacio libre a la distancia  $d_0$ , y  $\gamma$  es el exponente de las pérdidas por trayectoria el cual se obtiene a partir de la ecuación (2):

$$\gamma = a - bh_{Tx} + c/h_{Tx} \quad (2)$$

Donde  $h_{Tx}$  es la altura (en metros) de la antena de la estación base (BS: *Base Station*) sobre la superficie de la tierra ( $10 < h_{Tx} < 80$ ).

Los términos  $X_f$  y  $X_h$  son factores de corrección de frecuencia y la altura de la antena sobre el suelo, definidas como:

$$X_f = 6.0 \log \left[ \frac{f}{2000} \right] \quad (3)$$

$$X_h = -10.8 \log \left[ \frac{h_m}{2.0} \right] \quad \text{para terrenos tipo } A \text{ y } B \quad (4)$$

$$X_h = -20.0 - \log \left[ \frac{h_m}{2.0} \right] \quad \text{para terrenos tipo } C \quad (5)$$

Donde  $f$  es la frecuencia en MHz y  $h_m$  es la altura de la antena del usuario sobre el suelo, entre 2 y 10 m. El factor  $X$  representa los desvanecimientos por oscurecimientos causados por los obstáculos en la trayectoria de propagación. Los detalles de los desvanecimientos se darán en la sección 3E.

Las constantes  $a$ ,  $b$  y  $c$  se eligen de acuerdo al tipo de terreno, los cuales se clasifican como:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , donde el terreno tipo  $A$  se refiere a un terreno montañoso con alta densidad de árboles, el terreno tipo  $B$  se considera un terreno que es montañoso en su mayoría, con baja densidad de árboles, y el terreno  $C$  corresponde a un terreno principalmente plano con una baja o nula densidad de árboles.

Asimismo, para este análisis, se consideró un cuarto terreno, el cual corresponde a la zona norte de la Ciudad de México, donde sus principales características se muestran en la tabla 2 [13].

### C. Cálculo del enlace sin margen de desvanecimiento

El objetivo principal del cálculo del enlace, es determinar los niveles de potencia que deben alcanzar tanto el transmisor como el receptor para poder establecer una comunicación aceptable. En la tabla 3, se muestran los parámetros considerados en el cálculo del enlace [13]. En este caso no se consideran los efectos de desvanecimiento.

### D. Predicción de los porcentajes de área de cobertura sin desvanecimiento

La distancia máxima para cada perfil de ráfaga, se puede determinar a partir de la ecuación (6):

**Tabla 2.** Características para los diferentes tipos de terrenos.

Parámetros	Terreno $A$	Terreno $B$	Terreno $C$	Terreno Ciudad de México
$a$	4.6	4.0	3.6	
$b$	0.0075	0.0065	0.005	$\gamma = 4.1667$
$c$	12.6	17.1	20.0	

**Tabla 3.** Parámetros considerados para el cálculo del enlace.

Parámetros	Enlace de bajada	Notas
Número de antenas transmisoras ( $N_{ATx}$ )	2	Ganancia por diversidad en la transmisión $G_{DTX} = 10 \log_{10}(N_{ATx})$
Ganancia de la antena transmisora ( $G_{ATx}$ )	10 dB	Depende del fabricante: <i>Andrew Model</i> (DB910SN-W)
Pérdidas debido a los efectos no lineales del amplificador de potencia ( $L_{BACKOFF}$ )	0 dB	Se considera un amplificador altamente lineal
Pérdidas del transmisor ( $L_{Tx}$ )	3 dB	Debido a los conectores y cables
Ancho de banda del canal ( $B_w$ )	7 MHz	IEEE 802.16 soporta varios anchos de banda del canal
Nivel del ruido del receptor ( $N$ )	-154.54 dB @ 7 MHz	$-174 + 10 \log_{10}(BW)$
Figura de ruido en el receptor ( $N_p$ )	8 dB	Depende del equipo
Ganancia por diversidad macroscópica ( $G_{DM}$ )	0 dB	Si se utiliza por diversidad de selección
Sensibilidad del receptor ( $S_{min}$ )	-83.05 dBm	Para una modulación BPSK 1/2, Tasa de datos = 6.91 Mbps
Ganancia de la antena receptora ( $G_{RX}$ )	0 dB	
Pérdidas por trayectorias por penetración de construcciones	0 dB	Se asume un escenario al aire libre
Radio de la celda	1 km	Valor propuesto para el área de cobertura
Pérdidas de propagación ( $L_p$ )	127.2249 dB	Usando los parámetros de propagación ajustado al modelo de un terreno con irregularidades
Potencia a la salida del amplificador ( $P_{TX}$ )	34.17 dBm (2.6138 W)	Se calcula en función del radio y otros parámetros

$$P_{Tx} = S_{min} - \sum G + \sum L + [A + 10\gamma \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_f + X_h] \quad (6)$$

Para determinar las distancias de cobertura de los perfiles de ráfaga empleados en WiMAX despejamos  $d$  de la ecuación (6), obteniendo así:

$$d_i = d_0 10^{\frac{P_{Tx} - S_{min-i} + \sum G - \sum L - A - X_f - X_h}{10\gamma}} \quad (7)$$

Donde  $S_{min-i}$  es la sensibilidad para cada perfil de ráfaga, con  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ .

Una vez calculadas las distancias de cobertura para cada perfil de ráfaga determinamos el área que comprende a cada perfil, a partir de la figura 1 y la ecuación (8).

$$A_i = \pi d_i^2 - \pi d_{i-1}^2 \quad \text{con } i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \quad (8)$$

Donde  $d_i$  es la distancia alcanzada para cada perfil de ráfaga. Así, el porcentaje de área de cobertura se obtiene a partir de la ecuación (8):

$$\%A_i = \frac{A_i}{A_T} = \frac{\pi(d_i^2 - d_{i-1}^2)}{\pi d_i^2} \quad (9)$$

Donde  $A_T$  es el área total.

### E. Cálculo del margen de desvanecimientos

En los cálculos anteriores no fueron considerados los desvanecimientos, un fenómeno que presentan muy a menudo los sistemas de comunicación inalámbrica debido a los obstáculos en la trayectoria de propagación entre transmisor y receptor, como el que hemos estado analizando. En sí, los desvanecimientos son las variaciones que experimenta la señal cuando se propaga a través del canal inalámbrico, los cuales no pueden predecirse de forma precisa debido a que tiene un comportamiento aleatorio con una distribución log-normal [14].

Los desvanecimientos log-normal involucran a los niveles de la señal (en dB) y que éstos tengan una distribución gaussiana

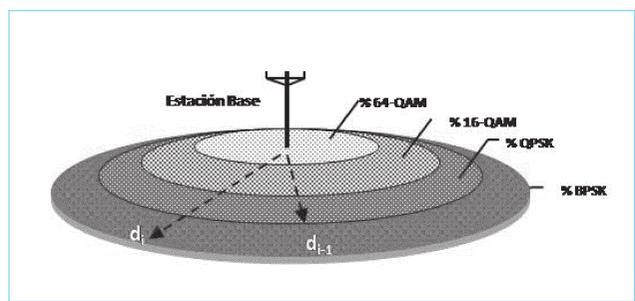


Fig. 1. Área de cobertura de la celda.

normal de media  $\mu = 0$ , varianza  $\sigma^2$  y una desviación estándar (que dependerá del tipo de terreno), en donde su función de densidad de probabilidad (PDF: Probability Density Function) se muestra en la ecuación (10):

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < \infty \quad (10)$$

Asimismo, para este análisis consideramos la probabilidad de no cobertura (*outage*), definida como la probabilidad de que la potencia recibida  $P_{Rx}$  a una distancia dada  $d [P_{Rx}(d)]$ , sea menor que la sensibilidad  $S_{min}$ . Por lo tanto, la probabilidad de no cobertura (*outage*), bajo efectos de desvanecimientos por oscurecimientos, se define en la ecuación (11), [13][14]:

$$P_{out} = P[P_{Rx}(d) < S_{min}] = P[P_{Tx} + \sum G - \sum L - L_p + X < S_{min}] \quad (11)$$

Dado que todos los parámetros que intervienen en la ecuación (11) son constantes, a excepción de  $X$  que es una variable aleatoria, es necesario agregarle a la potencia de transmisión, un margen de desvanecimiento por oscurecimientos ( $M_F$ ) para alcanzar el rendimiento necesario en el borde de la celda y obtener una probabilidad de no cobertura, dada por la ecuación (12):

$$P_{out} = P[P_{Tx} + M_F + \sum G - \sum L - L_p + X < S_{min}]$$

$$P_{out} = Q \left[ \frac{P_{Tx} + M_F + \sum G - \sum L - L_p - S_{min}}{\sigma} \right] \quad (12)$$

donde:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp \left[ -\frac{u^2}{2} \right] du \quad (13)$$

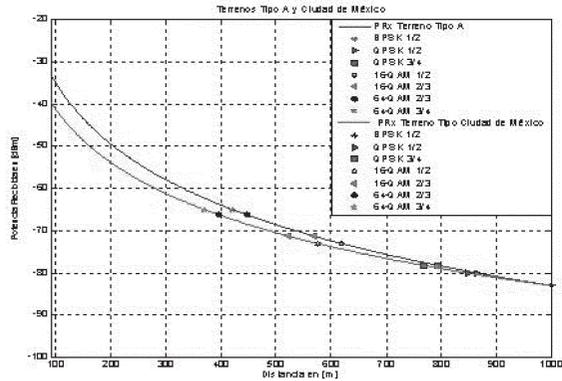
El margen de desvanecimiento  $M_F$  se determina mediante la ecuación (12), el cual está en función de la probabilidad de no cobertura requerida en el borde de la celda.

## 4. Resultados

En la tabla 4, se muestran los resultados obtenidos de la  $P_{Tx}$  requerida en los cuatro tipos de terreno fijando el radio de la celda a 1 km, sin considerar el margen de desvanecimiento. A partir de los resultados obtenidos, apreciamos que el terreno tipo A requiere una mayor  $P_{Tx}$  para establecer una cobertura total en la celda, debido a las grandes pérdidas por trayectoria mostradas, por otra parte, el terreno tipo C requiere una menor  $P_{Tx}$  para cubrir toda la celda, debido a que sus pérdidas por trayectoria son menores que las de los cuatro terrenos

**Tabla 4.** Valores de la potencia de transmisión requerida para cada tipo de terreno @ 1 km, sin margen de desvanecimiento.

Potencia de transmisión requerida	Tipo de terreno			
	A	B	C	Ciudad de México
$P_{Tx}$ en [dBm]	39.6711	35.4711	32.8877	34.1727
$P_{Tx}$ en [W]	9.2706	3.5246	1.9443	2.6138



**Fig. 2.** Potencia recibida y distancias alcanzadas por los perfiles de ráfaga en los terrenos tipo A y Ciudad de México.

presentados, mientras que el terreno tipo Ciudad de México ratifica sus valores comprendidos entre los terrenos tipo B y Tipo C.

A partir de la ecuación (7), determinamos las distancias de cobertura alcanzadas para cada perfil de ráfaga en los terrenos tipo A y Ciudad de México, donde analizando la figura 2, observamos que para ambos terrenos el perfil de ráfaga BPSK 1/2, tiene una mayor distancia de cobertura respecto a la estación base, ya que requiere una menor potencia en el receptor, pero se obtiene una baja tasa de datos, mientras que el perfil de ráfaga 64-QAM 3/4, presenta una menor distancia de cobertura respecto a la estación base, ya que requiere una mayor potencia de recepción, pero se obtiene una mayor tasa de datos.

En la tabla 5, mostramos los valores numéricos de las distancias de cobertura alcanzadas por cada

**Tabla 5.** Distancias entre los perfiles de ráfaga para los terrenos tipo A y Ciudad de México.

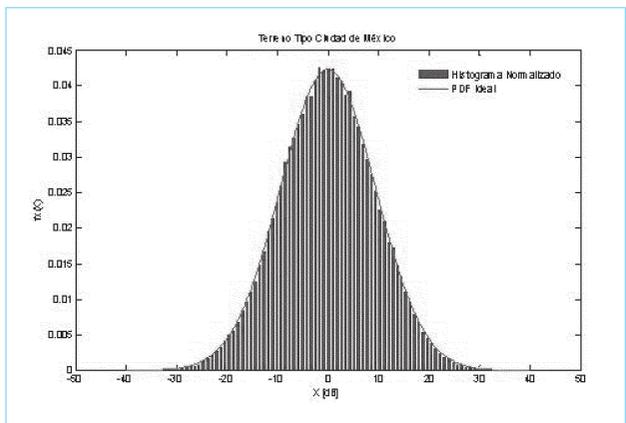
Perfil de ráfaga	Distancia entre perfiles de ráfaga para el terreno tipo A [m]	Distancia entre perfiles de ráfaga para el terreno tipo Ciudad de México [m]
BPSK 1/2	865.8360 - 1000	847.2299 - 1000
QPSK 1/2	794.1390 - 865.8360	767.0111 - 847.2299
QPSK 3/4	618.6574 - 794.1390	575.4434 - 767.0111
16-QAM 1/2	567.4285 - 618.6574	520.9583 - 575.4434
16-QAM 3/4	446.3092 - 567.4285	395.1882 - 520.9583
64-QAM 2/3	421.3178 - 446.3092	369.8317 - 395.1882
64-QAM 3/4	100 - 421.3178	92 - 369.8317

perfil de ráfaga en los terrenos tipo A y Ciudad de México, donde observamos una gran similitud entre los resultados obtenidos, teniendo una variación promedio de 3.0 m, entre ambos terrenos.

Los porcentajes del área de cobertura, sin considerar el margen de desvanecimiento, en los cuatro terrenos se muestran en la tabla 6, notándose que los porcentajes del área de cobertura que comprende a cada perfil de ráfaga en los cuatro tipos de terreno, tienen un margen de variación mínimo entre ellos. Del mismo modo, observamos que el perfil BPSK 1/2, tiene el mayor porcentaje de cobertura, desde la estación base hasta el borde de la celda, mientras que el perfil 64-QAM 2/3, presenta el menor porcentaje del área de cobertura, esto debido a que su distancia de cobertura es la menor de todos los perfiles de ráfaga mostrados.

**Tabla 6.** Porcentajes del área de cobertura en los cuatro tipos de terreno.

Perfil de ráfaga	$S_{min}$	Tipo de terreno			
		A	B	C	Ciudad de México
		Área [%]	Área [%]	Área [%]	Área [%]
BPSK 1/2	-83.05	25.0328	27.0779	28.5093	28.2201
QPSK 1/2	-80.05	11.9015	12.5865	13.0386	12.9492
QPSK 3/4	-78.25	24.7920	25.4328	25.7807	25.7171
16-QAM 1/2	-73.05	6.0762	6.0243	5.9587	5.9738
16-QAM 3/4	-71.25	12.2783	11.8175	11.4440	11.5224
64-QAM 2/3	-66.25	2.1683	2.0245	1.9181	1.9398
64-QAM 3/4	-65.05	17.7509	15.0364	13.3507	13.6775



**Fig. 3.** PDF de una variable aleatoria normal de  $\mu = 0$ ,  $\sigma = 9.4275$  dB.

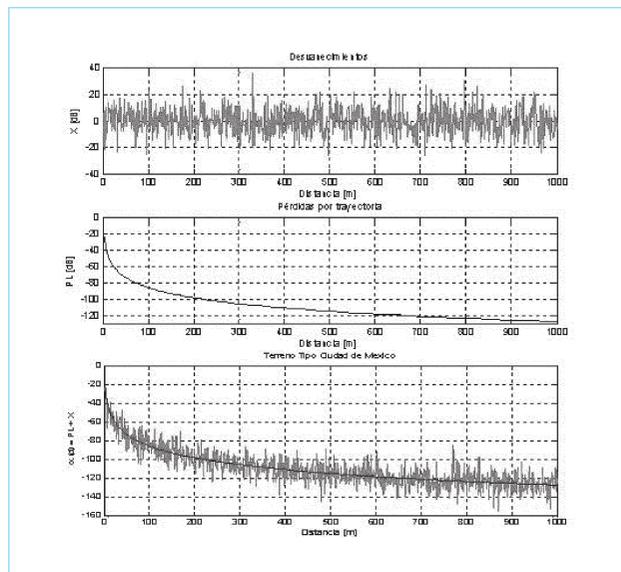
En la figura 3, se muestra el histograma normalizado de una variable aleatoria con distribución normal de  $\mu = 0$  y  $\sigma = 9.4275$  dB para el terreno tipo Ciudad de México, calculado con base en las características del terreno mostradas en la tabla 2.

El cálculo del margen de desvanecimientos para los cuatro tipos de terreno, proponiendo una probabilidad de no cobertura ( $P_{outage} = 0.1$ ) y fijando nuevamente el radio de la celda a 1 km, se muestran en la tabla 7.

Analizando la tabla 7, comprobamos que el margen de desvanecimientos se incrementa conforme aumenta la desviación estándar. El terreno que presenta un mayor margen de desvanecimientos es el terreno tipo *A*, debido a que considera una mayor cantidad de obstáculos, mientras que el terreno tipo *C* presenta un margen de desvanecimientos menor, debido a que es un terreno plano con una leve cantidad de

**Tabla 7.** Valores del margen de desvanecimiento para los cuatro tipos de terreno @ 1 km.

Parámetros	Tipo de terreno			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>México</i>
Desviación estándar $\sigma$ [dBm]	10.600	9.600	8.20	9.4275
Margen de desvanecimiento $M_F$ [dB]	13.568	12.288	10.49	12.0670



**Fig. 4.** Efecto combinado en el terreno tipo Ciudad de México.

obstáculos, comparado con los otros tres terrenos restantes. Asimismo, el terreno tipo Ciudad de México, se encuentra entre los valores comprendidos por los terrenos *B* y *C*.

En la figura 4, observamos el efecto combinado entre las pérdidas de propagación y los desvanecimientos para el terreno tipo Ciudad de México, donde observamos las variaciones aleatorias que sufre la señal durante la trayectoria de propagación y que serán incluidas en las evaluaciones posteriores para analizar su efecto.

En la tabla 8, se muestran los valores de la  $P_{Tx}$  para los cuatro tipos de terreno, @ 1 km, considerando los márgenes de desvanecimiento.

**Tabla 8.** Valores de la potencia de transmisión para los cuatro tipos de terreno considerando el margen de desvanecimiento.

Tipo de terreno	Margen de desvanecimiento $M_F$ [dB]	Potencia de transmisión total $P_{Tx}$ [dBm]
<i>A</i>	13.5680	53.2391
<i>B</i>	12.2880	47.7591
<i>C</i>	10.4960	43.3837
Ciudad de México	12.0672	46.2399

Analizando la tabla 8, se concluyó que para un terreno que presenta grandes irregularidades superficiales y adversidades de propagación, como lo es el terreno tipo *A*, se requiere una mayor  $P_{Tx}$ , para poder establecer una cobertura total de la celda, y por otra parte, para terrenos con irregularidades ligeras y poca adversidad de propagación, como son los terrenos *B*, *C* y Ciudad de México, se observó que requieren una menor  $P_{Tx}$ , para garantizar la misma cobertura en un radio de 1 km.

Es importante mencionar que para ambos casos de estudio, se generaron 80,000 posiciones distribuidas de manera uniforme, por lo que el valor de la probabilidad de no cobertura (*outage*) se determinó en toda el área de la celda.

En la tabla 9, se muestran los porcentajes del área de cobertura alcanzados por cada perfil de ráfaga únicamente para el terreno Ciudad de México, tomando en cuenta los desvanecimientos  $X$ , sin agregar el margen de desvanecimiento ( $M_F$ ) a la  $P_{Tx}$ .

Observando los resultados obtenidos en la tabla 9, notamos que los perfiles de ráfaga que poseen mayor porcentaje de cobertura, son los que tienen mayores distancias de alcance, por otra parte, es notorio el efecto de los desvanecimientos sobre la  $P_{Tx}$ , ya que los porcentajes de cobertura se ven afectados por estos, impactando de la misma forma en la probabilidad de no cobertura (*outage*), por lo que no se logra una cobertura confiable en la celda.

En la tabla 10, se exponen los porcentajes del área de cobertura, considerando el desvanecimiento  $X$  y agregando el margen de desvanecimiento ( $M_F$ ) a la  $P_{Tx}$ .

**Tabla 9.** Valores del porcentaje del área de cobertura alcanzado por cada perfil de ráfaga considerando el desvanecimiento  $X$ , sin margen ( $M_F$ ).

Perfil de ráfaga	$S_{min}$	Distancia entre perfiles de ráfaga para terreno tipo Ciudad de México [m]	Porcentaje de cobertura [%]
BPSK 1/2	-83.05	847.2299 - 1000	1.64
QPSK 1/2	-80.05	767.0111 - 847.2299	0.39
QPSK 3/4	-78.25	575.4434 - 767.0111	2.35
16-QAM 1/2	-73.05	520.9583 - 575.4434	0.21
16-QAM 3/4	-71.25	395.1882 - 520.9583	1.00
64-QAM 2/3	-66.25	369.8317 - 395.1882	0.04
64-QAM 3/4	-65.05	92 - 369.8317	4.22
Solicitudes aceptadas 36.78%			
Probabilidad de no cobertura $P_{outage}$ 63.21%			

**Tabla 10.** Valores del porcentaje del área de cobertura alcanzado por cada perfil de ráfaga considerando el desvanecimiento  $X$ , con margen ( $M_F$ ).

Perfil de ráfaga	$S_{min}$	Distancia entre perfiles de ráfaga para terreno tipo Ciudad de México [m]	Porcentaje de cobertura [%]
BPSK 1/2	-83.05	847.2299 - 1000	3.73
QPSK 1/2	-80.05	767.0111 - 847.2299	0.98
QPSK 3/4	-78.25	575.4434 - 767.0111	5.60
16-QAM 1/2	-73.05	520.9583 - 575.4434	0.43
16-QAM 3/4	-71.25	395.1882 - 520.9583	2.30
64-QAM 2/3	-66.25	369.8317 - 395.1882	0.08
64-QAM 3/4	-65.05	92 - 369.8317	9.43
Solicitudes aceptadas 75.44%			
Probabilidad de no cobertura $P_{outage}$ 24.55%			

Analizando la tabla 10, observamos inmediatamente una mejora en la cobertura de los porcentajes de cada uno de los perfiles de ráfaga en cuestión, asimismo, en lo que corresponde a la  $P_{outage}$ , resulta evidente su disminución, incrementando la confiabilidad de cobertura.

## 5. Conclusiones

En este trabajo determinamos las distancias de cobertura alcanzadas por los perfiles de ráfaga utilizados en las redes inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.16-d. Empleando los modelos de propagación SUI IEEE 802.16, estimamos las pérdidas por trayectoria en los cuatro terrenos evaluados para poder observar sus características de propagación y poder establecer un punto de comparación entre el terreno con más adversidades de propagación y el terreno tipo Ciudad de México. Con las ecuaciones de la  $P_{Tx}$  y  $P_{Rx}$  corroboramos que los terrenos con gran densidad de obstáculos, son los que presentan mayores pérdidas por trayectoria, lo que conlleva obligatoriamente realizar un aumento en la  $P_{Tx}$  para poder establecer la cobertura deseada, lo que a su vez impacta en el sistema de comunicaciones en cuanto costos y duración de la vida útil de los equipos en cuestión. Empleando las ecuaciones de la  $P_{Tx}$ , sin considerar los desvanecimientos, se estimaron las distancias de cobertura alcanzadas por cada perfil de ráfaga, concluyendo que el porcentaje del área de cobertura, está en función de la distancia alcanzada por cada perfil, es decir, entre mayor sea la distancia de cobertura alcanzada, mayor será el porcentaje del área de cobertura. Para el caso donde se consideraron los desvanecimientos y se agregó el margen de desva-

necimientos a la  $P_{Tx}$ , se obtuvo una mayor eficiencia en cuanto a porcentajes de coberturas y solicitudes aceptadas, lográndose una mejor confiabilidad de la cobertura en la celda, comparado con el caso donde no se agregó el margen de desvanecimiento. En base a lo anterior, será posible establecer mecanismos de adaptación al enlace que considere la posición que tiene el usuario, dadas las distintas regiones de cobertura de cada perfil de ráfaga, respecto a la estación base, así como el efecto de los desvanecimientos.

## Referencias

- [1] G. S. Paschos, P. Mannersalo, y T. M. Bohnert, "Cell Capacity for IEEE 802.16 Coverage Extension", *IEEE Communications Society CCNC 2008*.
- [2] J. G. Andrews, A. Ghosh, y R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall, Massachusetts USA, 2007.
- [3] L. Nuaymi, *WiMAX Technology for Broadband Wireless Access*, John Wiley & Sons Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2007.
- [4] K. C. Chen, y J. R. B. de Marca, *Mobile WiMAX*, John Wiley & Sons Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2008.
- [5] K. Etermad, Intel Corporation, "Overview of Mobile WiMax Technology and Evolution", *IEEE Communications*, vol. 0163-6804/08, octubre 2008.
- [6] Q. Li, X. E. Lin, J. Zhang, y W. Roh, "Advancement of MIMO Technology in WiMAX: From IEEE 802.16d/e/j to 802.16m", *IEEE Communications*, vol. 0163-6804/09, junio 2009.
- [7] *WiMAX and the IEEE 802.16m Air Interface Standard*, abril 2010.
- [8] C. Tarhini, y T. Chahed, *On capacity of OFDMA-based IEEE 802.16 WiMAX including Adaptive Modulation and Coding (AMC) and inter-cell interference*.
- [9] *Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, IEEE Std 802.16-2004, LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society and IEEE Microwave Theory and Techniques Society, octubre 2004.
- [10] R. Pabst, J. E. M. Schinnenburg, y C. Hoymann, "System Level Performance of Cellular WiMAX IEEE 802.16 with SDMA-enhanced Medium Access", *IEEE WCNC 2007*.
- [11] H. Anderson, *Fixed Broadband Wireless System Design*, John Wiley & Sons Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2003.
- [12] M. D. Katz, y F. H. P. Fitzek, *WiMAX Evolution: Emerging Technologies and Applications*, John Wiley & Sons Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2009.
- [13] J. E. Rojas Lima, J. P. Abarca Reyna, y R. Morales Ballesteros, "Cell Coverage Issues On WiMAX Networks For Fixed Broadband Wireless Access", *2nd International Conference on Wireless Communications in Underground and Confined Areas*, Val-d'Or Québec Canada, agosto 25-27, 2008.
- [14] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.

# Periódica

## Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias

<http://www.dgbiblio.unam.mx/>

[http://132.248.9.1:8991/F/-/?func=find-b-0&local\\_base=PER01](http://132.248.9.1:8991/F/-/?func=find-b-0&local_base=PER01)