

Efecto de la Atenuación por Precipitación y Niebla para Sistemas Wi-Max en el rango de 10 a 66 GHz en entornos aplicables para Colombia*

Fabio G. Guerrero^a, Rubén D. Montoya^b

(a) Universidad del Valle, Cali, Colombia

(b) INTELREDWI-FI

**e-mail: fgurrer@univalle.edu.co*

(Recibido: Abril 30 de 2008- Aceptado: Noviembre 19 de 2008)

RESUMEN

Este artículo explica de una forma clara y sencilla cómo calcular la atenuación media causada por la presencia de lluvia y niebla en un enlace inalámbrico para frecuencias mayores a 10 GHz, donde estos factores se tornan considerables. Estos resultados de atenuación por lluvia y niebla se usan para el estudio de su efecto sobre la capa física de la tecnología inalámbrica Wi-Max definida en el estándar IEEE. 802.16-2004 PHY WirelessMAN-SCTM. El modelo del canal también incluye los efectos de atenuación por distancia (path loss) y ruido blanco gaussiano (AWGN).

PALABRAS CLAVE: Atenuación, Canal, IEEE 802.16, Inalámbrico, ITU, Lluvia, Niebla, Wi-Max.

Effect of the Attenuation for Precipitation and Fog for Wi-Max Systems in the range of 10 to 66 GHz in applicable environments for Colombia

ABSTRACT

This paper explains in a clear and simple way how to calculate the attenuation caused by the rain and fog presence in a wireless connection for higher frequencies greater than 10 GHz, where these factors may become considerable. These attenuation results both for rain and fog are used for the study of their effect on the physical layer of wireless technology Wi-Max defined in the standard IEEE 802.16-2004 PHY WirelessMAN-SCTM. The channel model also includes the attenuation effects for distance (path loss) and additive white Gaussian noise (AWGN).

KEYWORDS: attenuation, Channel, IEEE 802.16, Wireless, ITU, Rain, Fog, Wi-Max.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el análisis de enlaces inalámbricos se ha vuelto muy popular debido al surgimiento y amplia aceptación de nuevas tecnologías inalámbricas como Bluetooth, IEEE 802.11 (Wi-Fi), e IEEE 802.16 (Wi-Max).

En los enlaces inalámbricos se presentan ciertos fenómenos diferentes a los presentes en medios cableados que corrompen la señal y afectan el desempeño del enlace como son: atenuación debida a la distancia (*Path Loss*), desvanecimiento causado por multitrayectoria (*Fading*), pérdidas debido a la lluvia y niebla (*rain attenuation*). Estos fenómenos, con excepción de la multitrayectoria [1], se vuelven significativos a frecuencias mayores de 10 GHz. Por esta razón es muy importante tener en cuenta estas pérdidas y la forma de calcularlas al momento de diseñar enlaces de banda ancha inalámbricos en zonas tropicales, donde la lluvia es una variable constante a lo largo del año.

El objetivo de este artículo es presentar de una forma sencilla una buena aproximación al cálculo de las pérdidas presentes en un canal debido a la atenuación por lluvia y niebla, y mostrar con varios ejemplos su incidencia sobre un enlace para la tecnología inalámbrica Wi-Max, utilizando un modelo de simulación de la capa física del estándar IEEE 802.16-2004 PHY WirelessMAN-SCTM desarrollado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, Cali, Colombia [2].

El presente artículo se encuentra organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta el cálculo de atenuación por lluvia y niebla siguiendo las recomendaciones ITU-R y se presenta una descripción corta del modelo de simulación de la capa física IEEE 802.16-2004 PHY WirelessMAN-SCTM desarrollado en este trabajo; en la sección 3 se presentan los resultados obtenidos para diferentes entornos de simulación, incluyendo una discusión de los mismos; finalmente en la sección 4 se resumen las principales conclusiones de este trabajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el cálculo de la atenuación, en dB/km, debida a la lluvia y a la niebla se debe obtener primero la intensidad de precipitación, en mm/h, del sitio de operación del enlace según la recomendación ITU-R P837-4 [3]. A su vez, la atenuación por niebla (dB/km) se calcula siguiendo la recomendación ITU-R P840-3 [4].

2.1 Cálculo de las características de precipitación

Debido a la presencia de atenuación y dispersión producida por la precipitación en enlaces inalámbricos para frecuencias superiores a 10 GHz, es necesario conocer las estadísticas de intensidad de precipitación del sitio de operación del enlace. La ITU-R recomienda tomar los datos de un análisis realizado durante 15 años sobre las características de precipitación en el mundo. Este análisis fue realizado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (CEPMPM), el cual se encuentran en [3]. Las estadísticas recogidas en este informe se encuentran también en medio magnético en los archivos `esarainpr6.txt`, `esarainlat.txt`, `esarainlat.txt`, `esarain_mc.txt` y `esarainlon.txt`, que se pueden descargar de la página web de la ITU-R dedicada a la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones. Junto a esta información se encuentra disponible una aplicación de este modelo y los datos asociados de MATLAB en los archivos de datos `climpara98` y el código `pedrain.m`, con los cuales se encuentra la intensidad de lluvia en unas coordenadas determinadas y a una probabilidad indicada.

Con estos archivos y siguiendo las instrucciones presentes en [3], se obtiene la intensidad de precipitación (en mm/h), valor con el cual se obtiene luego la atenuación en decibeles del canal a unas características dadas.

La tabla 1 presenta los valores recogidos de intensidad de lluvia media anual utilizados en las simulaciones de este trabajo. Se tomaron coordenadas espaciales de ciudades reconocidas de Colombia y el mundo para relacionar la intensidad de lluvia con zonas fácilmente

Tabla 1. Valores simulados de intensidad de precipitación

Ciudad	Latitud	Longitud	R (mm/hr)
Cali	3,55	-76,383	10,0378
Bogotá	4,7	-74,13	9,9474
Quibdo	5,71	-76,61	23,1087
Cartagena	10,45	-75,51	7,4815
Caracas	10,5	-66,883	5,4077
Miami	25,79	-80,316	5,9749
New York	40,783	-73,966	4,4223
Londres	51,5	-0,5	3,0693
Paris	48,86	2,33	3,3404
Berlín	52,516	13,4	2,7566
Moscú	55,98	37,5	2,6741
Tokio	35,685	139,751	5,4729
Beirut	33,871	35,509	1,9598
Bagdad	33,33	44,393	1,0918
Pretoria	-25,706	28,229	2,6264
Buenos Aires	-34,587	-58,6752	4,8395
Pekín	39,92	116,388	3,6873
Sydney	-0,9	169,55	20,5244

identificables como áridas, intermedias o altamente lluviosas. Para la simulación se tomó un valor de probabilidad de lluvia igual al 50%.

2.2 Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia

La atenuación específica γ_R (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de la lluvia R (mm/h) mediante la ley potencial:

$$\gamma_R = KR^\alpha \quad (1)$$

Los valores de los coeficientes K y α se determinan en función de la frecuencia en el rango de 1 a 1000 GHz, a partir de las siguientes ecuaciones, como se indica en la recomendación ITU-R P838-3 [5]:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (2)$$

$$\epsilon = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (3)$$

donde:

f : frecuencia (GHz)
 k : puede ser kH ó kV
 α : puede ser H ó V.

Los valores de las constantes para los coeficientes utilizados en (2) y (3) para diferentes polarizaciones se encuentran definidos en [5]. En el tabla 2 se muestran, a manera de ejemplo, los valores de las constantes para el coeficiente k_H de polarización horizontal; en la tabla 3 para el coeficiente k_V de polarización vertical; en la tabla 4 se indican los valores de las constantes para el coeficiente α_H de polarización horizontal, y en la tabla 5 para el coeficiente α_V de polarización vertical.

Tabla 2. Coeficientes para K_H

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5,3398	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,2697	0,454		
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Tabla 3. Coeficientes para K_V

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Tabla 4. Coeficientes para α_H

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,34990		

Tabla 5. Coeficientes para α_V

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,11622		
5	48,5833	0,1791459	0,11647		

En [5] se encuentran los valores de los coeficientes de K y α tanto gráficos como los valores numéricos para determinadas frecuencias.

El cálculo de atenuación para valores de R , distancia y frecuencia (de 1 a 400 GHz) dados, se encuentra sistematizado en el archivo en lenguaje C rainattnver2.c desarrollado por H.Wakai y N.Wakai. Este código se encuentra disponible en la página web de ITU [6].

2.3 Atenuación debida a las nubes y a la niebla

Para las nubes y la niebla (gotas inferiores a 0,01 cm), la aproximación de Rayleigh es válida para frecuencias inferiores a 200 GHz. La atenuación específica en el interior de una nube o de la niebla puede expresarse como:

$$\gamma_c = K_l \cdot M \quad \text{dB/km} \quad (4)$$

siendo:

γ_c : atenuación específica (dB/km) en la nube
 K_l : coeficiente de la atenuación específica ((dB/km)/(g/m³))
 M : densidad de agua líquida en la nube o la niebla (g/m³).

En frecuencias del orden de 10 GHz y superiores, la atenuación debida a la niebla puede ser significativa. La densidad de agua líquida es típicamente de unos 0,05 g/m³ en la niebla moderada (visibilidad del orden de 300 m) y de 0,5 g/m³ en niebla espesa (visibilidad del orden de 50 m). Valores tomados de [4].

Coficiente de atenuación específica

Según se indica en la recomendación ITU-R P840-3 [4], para calcular el valor de K_l se puede utilizar un modelo matemático válido hasta frecuencias de 1000 GHz basado en la dispersión de Rayleigh, que utiliza un modelo Debye doble para la permitividad dieléctrica $\epsilon(f)$ del agua. Por tanto:

$$K_l = \frac{0,819 \cdot f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \quad \text{(dB/km)/(g/m}^3\text{)} \quad (5)$$

donde f es la frecuencia en GHz, y:

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad (6)$$

La permitividad dieléctrica compleja del agua viene dada por:

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s[1 + (f/f_s)^2]} \quad (7)$$

$$\epsilon'(f) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \epsilon_2 \quad (8)$$

donde:

$$\epsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1) \quad (9)$$

$$\epsilon_1 = 5.48$$

$$\epsilon_2 = 3.51$$

$$\theta = 300/T$$

donde T es la temperatura en grados Kelvin.

Las frecuencias de relajación principal y secundaria son:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \quad \text{GHz} \quad (10)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \quad \text{GHz} \quad (11)$$

La fig. 1 muestra los valores de K_l para frecuencias entre 5 y 200 GHz y temperaturas entre -8°C y 20°C [4]. Para atenuaciones debidas a las nubes, recomienda utilizar la curva correspondiente a 0°C.

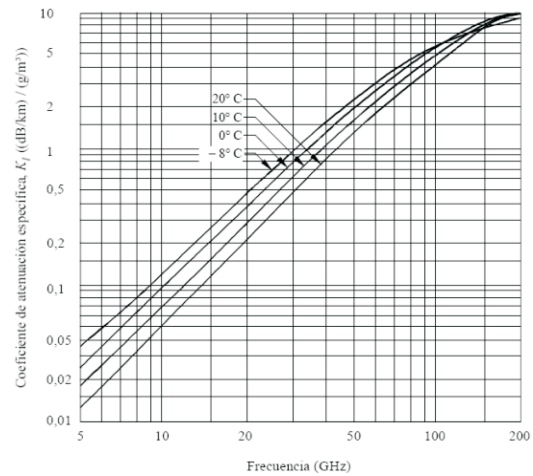


Fig. 1. Atenuación específica de las pequeñas gotas de agua a diversas temperaturas en función de la frecuencia. Fuente: Recomendación ITU-R P840-3 [4].

2.4 Simulación capa física estándar IEEE 802.16-2004 PHY WirelessMAN-SCTM

El simulador para la capa física de Wi-Max WirelessMAN-SCTM fue escrito en Matlab 7.0. Este simulador consta básicamente de 6 bloques funcionales en el transmisor, y sus respectivos pares en el receptor, es decir, permite analizar el enlace entre la estación base transmitiendo y la estación subscritora (*downlink*) o viceversa (*uplink*). Estos Bloques son:

- Aleatorizador.
- Codificador FEC.
- Adición del Preámbulo.
- Mapeo de símbolos.
- Filtro Banda base.
- Modulador e interfaz física.

El codificador FEC puede ser seleccionado de 4 diferentes configuraciones:
Configuración 1 (obligatoria).

Código externo: Reed-Solomon GF(256) [7].
Código interno: ninguno.

Configuración 2 (obligatoria).
Código externo: Reed-Solomon GF(256).
Código interno: código de bloque convolucional (24,16).

Configuración 3 (opcional).
Código externo: Reed-Solomon GF(256). Código interno: Bit de paridad (9,8).

Configuración 4 (opcional).
Código externo: Turbo código de producto (BTC) el cual está compuesto de codificadores Hamming en dos dimensiones.
Código interno: ninguno.

El código Reed-Solomon GF(256) tiene un bloque de longitud variable de 6 a 255 bytes y capacidad de corrección de error de 1 a 16 errores configurables en el simulador. Los tipos de modulación permitidos son QPSK, 16QAM y 64QAM. Con el fin de reducir los tiempos de simulación de la capa física del estándar a valores prácticos, la simulación se realiza en banda base sin perder sus características matemáticas.

Los valores de atenuación correspondientes a las pérdidas por la intensidad de lluvia y niebla se aplicaron en el modelo teniendo en cuenta además de la lluvia, la presencia de ruido blanco gaussiano (AWGN) y pérdidas por distancia (*path loss*). Como se mencionó antes, para frecuencias mayores a 10 GHz los efectos de multitrayectoria se pueden considerar despreciables dada la muy pequeña longitud de onda que se tiene a estas frecuencias. La figura 2 ilustra el modelo del canal simulado.

Se realizaron pruebas al canal con diferentes tipos de codificación y modulación, además de los diferentes tipos de atenuación debida a la lluvia y distancia. También se hicieron pruebas para diferentes frecuencias comprendidas entre 10 y 66 GHz que son las frecuencias en las que trabaja la tecnología objeto de este trabajo y especialmente en la frecuencia de 28 GHz que es la banda licenciada para LMDS en Colombia.

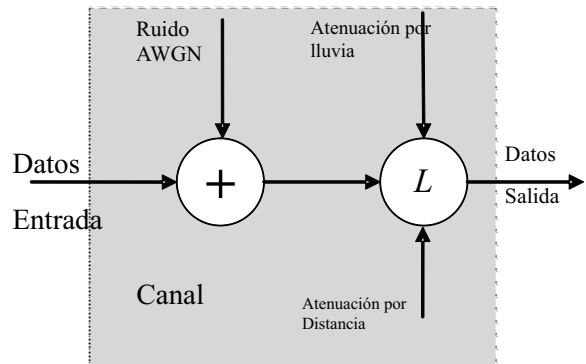


Figura 2. Modelo del canal de comunicaciones simulado.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos para diferentes entornos de simulación. En la figura 3 se presenta el resultado de la simulación en un entorno a una intensidad de lluvia y distancia constantes para observar el comportamiento del enlace con diferentes tipos de modulación y con la presencia o ausencia de atenuación por pérdidas por propagación. En la figura 3 se observa claramente cómo la inclusión de las pérdidas por propagación no afecta en un factor considerable la curva BER (Bit Error Rate) en relación a la curva BER que no considera estas pérdidas. Esto se puede explicar debido a que las

pérdidas por atenuación debidas a la distancia son factores que se consideran al momento de configurar la potencia de transmisión y ganancia de la antena de transmisión, es decir la potencia efectiva radiada isotrópica (EIRP).

En la figura 4 se muestra el efecto del cambio de frecuencias de transmisión en el desempeño del enlace. En este caso, a pesar de utilizar una modulación robusta como QPSK, la tasa de error de bit se ve afectada por la frecuencia de operación del enlace. En la figura 4 se observa también el gran efecto de protección del esquema de corrección de errores en la capa física de la tecnología bajo estudio. Para este caso se ha seleccionado una capacidad de corrección de 16

errores, la cual es la mayor capacidad de corrección de errores permitida por el código Reed-Solomon definido en la especificación.

En las figuras 5 y 6 se puede observar cómo al trabajar con un esquema de codificación más robusto el incremento en la intensidad de precipitación tiene un efecto menor en la calidad del enlace. En la figura 5 se ha utilizado modulación 16QAM a una frecuencia de 28 GHz. Se puede observar que la intensidad de precipitación afecta considerablemente el desempeño, algo que no ocurre para modulaciones más robustas (QPSK), como se muestra en la figura 6.

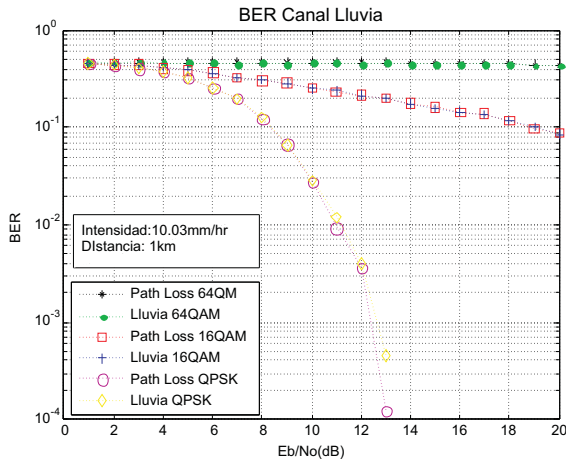


Figura 3. Análisis del BER versus E_b/N_0 bajo los efectos de atenuación por pérdidas por propagación.

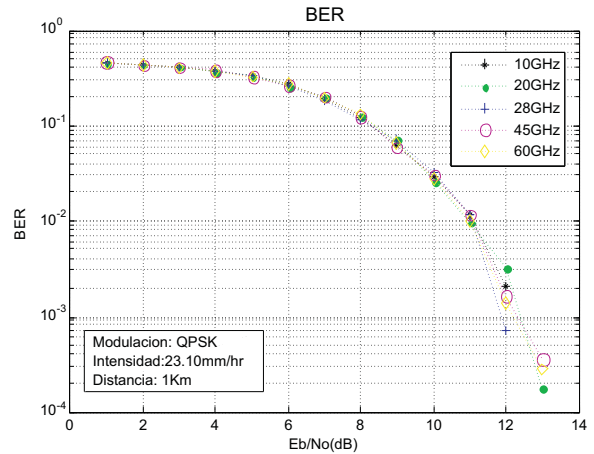


Figura 4. Curva BER versus E_b/N_0 para una intensidad de precipitación constante y frecuencia variable.

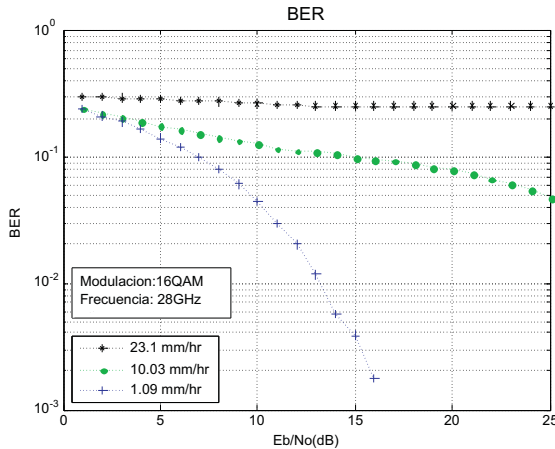


Figura 5. BER versus E_b/N_0 usando 16QAM con variaciones en la intensidad de precipitación.

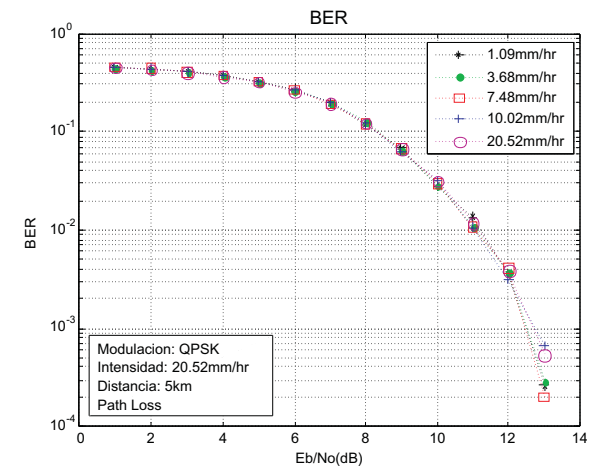


Figura 6. BER versus E_b/N_0 usando modulación QPSK con variaciones en la intensidad de precipitación.

Al igual que para hacer un enlace más resistente al efecto de la intensidad de lluvia se usan modulaciones más robustas, a mayor distancia también se deben usar modulaciones más robustas para contrarrestar el efecto de disminución de E_b dado que la distancia aumenta linealmente la atenuación (en dB) a una intensidad de lluvia determinada.

En las figuras 7 y 8 se observa el efecto de la distancia en el enlace para dos tipos de modulación distintos. En la figura 7 se utiliza modulación 16QAM, mientras en la figura 8 se utiliza modulación QPSK. Los efectos del incremento de distancia en el enlace se asemejan a los incrementos de intensidad de precipitación en el mismo.

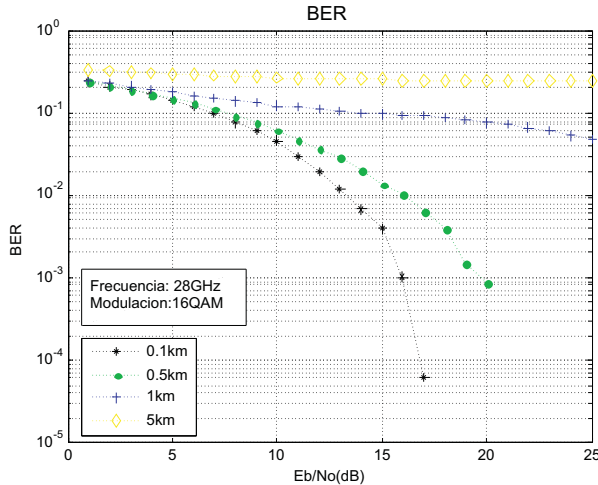


Figura 7. BER versus E_b/N_0 usando 16QAM con distancia del enlace variable.

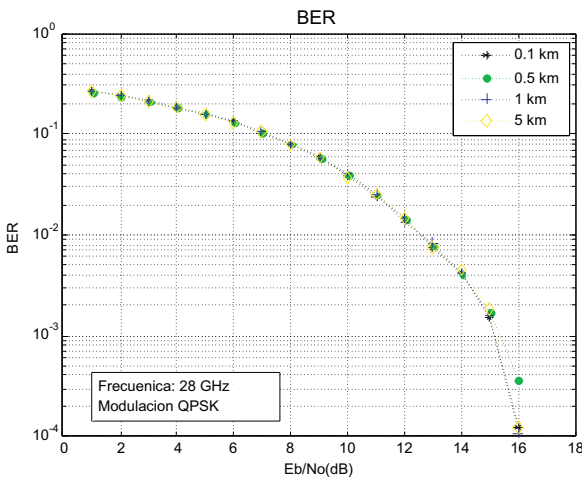


Figura 8. BER versus E_b/N_0 para QPSK con distancia del enlace variable.

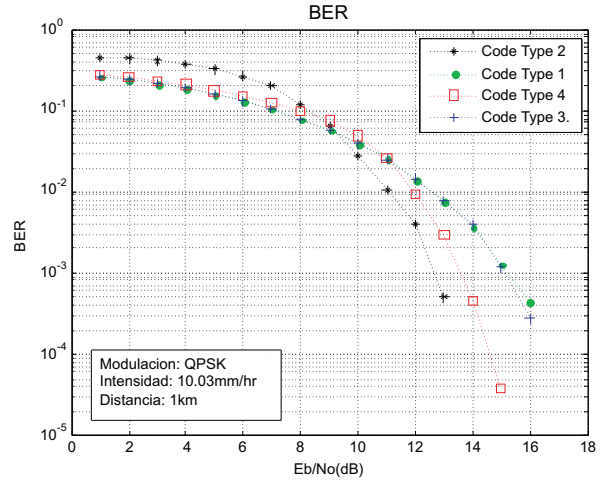


Figura 9. BER versus E_b/N_0 para QPSK con diferentes técnicas de codificación.

En la figura 9 se observa el efecto de la codificación de canal (corrección de errores) en el enlace para un mismo tipo de modulación. Como se observa en la figura 9 para el esquema de corrección tipo 2 (el cual provee la mayor capacidad de corrección de errores) se obtuvo el mejor desempeño, como era de esperarse.

4. CONCLUSIONES

La simulación demuestra que la atenuación debida a la lluvia se vuelve un factor importante cuando se trata de enlaces en frecuencias superiores a 10 GHz. Se ha verificado cuantitativamente que al aumentar la intensidad de precipitación el valor de BER aumenta, traduciéndose en un deterioro de la calidad de la comunicación. Esta degradación se suma a la degradación propia causada por las pérdidas de propagación debidas a la distancia en el enlace.

Se ha podido verificar que al utilizar tipos de modulación más robustos se pueden contrarrestar estos efectos del deterioro en las condiciones del canal, donde no se logran grandes velocidades de transmisión de datos pero el sistema logra un desempeño aceptable (en términos de BER) del enlace.

También se ha verificado el efecto del uso de técnicas de corrección de error. En las simulaciones se pudo observar que el tipo de corrección de error (FEC) tipo 2 que utiliza tanto

código externo como código interno, brinda la mayor confiabilidad del enlace, en comparación de aquellos que sólo utilizan un código externo o un código de sólo chequeo de paridad.

También es útil notar que el tipo 4 de codificación de canal, que utiliza doble codificación Hamming en configuración tipo turbo (BTC), es más robusto que el tipo 1, que utiliza codificación Reed-Solomon. Esto valida una vez más la gran acogida de los esquemas de turbo codificación en el desarrollo de los estándares de capa física en las tecnologías de comunicaciones actuales, donde se puede obtener un muy buen resultado a partir de códigos sencillos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IEEE Std. 802.16-2004. *Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*. pág.1

[2] R. D. Montoya, *Simulación de la interfaz de aire para sistemas fijos de acceso inalámbrico de banda ancha Wimax (IEEE 802.16-2004)*, Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, 2007.

[3] Recomendación UIT-R P.837-4. *Características de la precipitación para establecer modelos de propagación*.

[4] Recomendación UIT-R P.840-3. *Atenuación debida a las nubes y a la niebla*.

[5] Recomendación UIT-R P.838-3. *Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción*

[6] <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=documents&link=rsg3&lang=es>

[7] R. B. Wells, *Applied Coding and Information Theory for Engineers*. New York. Prentice Hall, 1999.

