

TESIS DEFENDIDA POR

**Jesús Alfredo Flores Osorio**

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

M.C. Jorge Enrique Preciado Velasco

*Director del Comité*

---

Dr. Hugo Homero Hidalgo Silva

*Miembro del Comité*

---

M.C. Raúl Tamayo Fernández

*Miembro del Comité*

---

M.C. Miguel Ángel Aguayo Ortuño

*Miembro del Comité*

---

Dr. Ma. del Carmen Maya Sánchez

*Coordinador del programa de posgrado  
en Electrónica y Telecomunicaciones*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

*Director de Estudios de Posgrado*

10 de noviembre de 2009

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

---

**Estudio de Modelos de Propagación para la Implantación de una Red WiMAX en  
3.3GHz en el Estado de Colima**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Jesús Alfredo Flores Osorio

Ensenada, Baja California, México, noviembre de 2009.

**RESUMEN** de la tesis de **Jesús Alfredo Flores Osorio**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES con orientación en TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California, noviembre de 2009.

**ESTUDIO DE MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA LA IMPLANTACIÓN DE  
UNA RED WiMAX EN 3.3GHz EN EL ESTADO DE COLIMA**

Resumen aprobado por:

---

M.C. Jorge Enrique Preciado Velazco

Director de Tesis

En esta tesis se presenta un análisis de los modelos de propagación propuestos para redes inalámbricas fijas en la banda de 3.3GHz. Del estudio se deduce que los modelos de propagación Erceg y COST-231, no son válidos para predecir las pérdidas por trayectoria en escenarios rurales. Además, se propone un modelo de propagación para operar en la banda de 3.3GHz para áreas rurales en el estado de Colima, México. El modelo propuesto es derivado de los resultados de la simulación de una red WiMAX utilizando el software Radio Mobile como herramienta de diseño. El modelo propuesto es validado con las investigaciones realizadas por Abhayawardhana (2005) e Imperatore (2007), en donde se estableció una red WiMAX físicamente y posteriormente se realizaron mediciones con el propósito de estimar el modelo de pérdidas por trayectoria. En la comparación se observa que las curvas que representan las pérdidas por trayectoria tienen una tendencia similar, lo cual permite concluir que el exponente de pérdidas por trayectoria para escenarios rurales en la banda de frecuencia de 3.3GHz a 3.5GHz está en el intervalo de 2.13 y 2.5, como lo muestran otros estudios.

**Palabras Clave:** Modelos de Propagación, Pérdidas por trayectoria, WiMAX fijo.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Jesús Alfredo Flores Osorio** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in ELECTRONICS AND TELECOMUNICATIONS with orientation in TELECOMUNICATIONS. Ensenada, Baja California, México November 2009.

## **PROPAGATION MODELS STUDY FOR THE IMPLEMENTATION OF A WiMAX NETWORK AT 3.3GHz IN THE STATE OF COLIMA**

An analysis of the propagation models proposed for fixed wireless network in the 3.3GHz frequency band is presented in this thesis. From the study it is concluded that the Erceg and COST-231 propagation models are not valid for the path loss prediction in rural scenarios. A propagation model is also proposed to operate in the 3.3GHz frequency band for the rural areas in Colima, México; the proposed model is derived from the simulation results of a WiMAX network, using the Radio Mobile software as a simulation tool. The proposed model is validated against results reported by Abhayawardhana (2005) and Imperatore (2007), where a WiMAX network was deployed, and the path loss model was estimated from measurements in the field. After the comparison is observed that the curves that represent the path loss present a similar behavior. That allows concluding that the path loss exponent for rural scenarios in the 3.3GHz to 3.5GHz frequency band is in between 2.13 and 2.5, as observed in other studies.

A mis sobrinos

Karla, Pepe y Juan Pablo

A mis padres

A mis hermanos

Griselda, Juan Carlos y Manuel

## Agradecimientos

A Dios, por haberme brindado sabiduría y fortaleza para terminar este trabajo.

A mis padres y hermanos, por demostrarme su apoyo y motivación durante esta etapa de mi vida.

A mi Comité de tesis: M.C. Jorge Enrique Preciado Velasco, Dr. Hugo Homero Hidalgo Silva, M.C. Raúl Tamayo Fernández y al M.C. Miguel Ángel Aguayo Ortuño, por sus comentarios y recomendaciones.

A Mario López López, por sus comentarios y motivación

A todos aquellos que por alguna razón se involucraron en este trabajo, a través de su disponibilidad, crítica y consejos.

A mis Compañeros del CICESE: Adán, Alejandro, Cecilia, Daniel Escobedo, Daniel García, Eduardo, Israel, Iván, Jacobo, Jaquelin, Juan Carlos, Miguel y Naihvy, por hacer de este tiempo un ciclo agradable.

Al Director de Estudios de Posgrado Dr. David H. Covarrubias Rosales, por el apoyo recibido durante la fase final de este trabajo.

A la Universidad de Colima, por el apoyo recibido durante el desarrollo de este proyecto de investigación.

Al CICESE por permitirme cursar la Maestría en Ciencias.

Al CONACyT por el apoyo económico brindado durante estos años.

## Contenido

	Página
Resumen en Español	i
Resumen en Inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	x
<b>I. Introducción .....</b>	<b>1</b>
I.1 Motivación .....	1
I.2 Planteamiento del problema .....	3
I.3 Objetivo de la tesis .....	4
I.4 Alcances y limitaciones .....	4
I.5 Metodología de la investigación .....	5
I.6 Organización del trabajo .....	5
<b>II. WiMAX .....</b>	<b>6</b>
II.1 Introducción .....	6
II.2 Antecedentes del estándar IEEE 802.16 y WiMAX .....	6
II.3 Perfiles de sistema y certificación .....	7
II.4 Características WiMAX .....	9
II.5 Capa física WiMAX .....	10
II.5.1 Fundamentos OFDM .....	11
II.5.2 Parámetros OFDM en WiMAX .....	11
II.5.3 Subcanalización OFDMA .....	13
II.6 Bandas de operación WiMAX .....	14

## Contenido (Continuación)

<b>III. Modelos de propagación</b> .....	<b>17</b>
III.1 Introducción .....	17
III.2 Ambientes de propagación .....	18
III.3 Acceso de banda ancha fija .....	19
III.4 Modelos de propagación .....	19
III.4.1 Modelo de Erceg .....	20
III.4.2 Modelo Hata COST-231 .....	24
III.4.3 Modelos en Ley de Potencia .....	26
III.4.4 Modelos de propagación WiMAX para la banda de 3.5GHz .....	28
III.4.5 Propuesta de modelo de propagación para la banda de 3.3GHz .....	29
III.5 Conclusiones .....	30
<b>IV. Simulación y análisis de modelo de propagación propuesto</b> .....	<b>31</b>
IV.1 Introducción .....	31
IV.2 Diseño de red WiMAX .....	31
IV.3 Clasificación de escenarios .....	35
IV.4 Consideración de parámetros .....	37
IV.5 Ajuste por mínimos cuadrados .....	43
IV.5.1 Ajuste a una línea recta .....	44
IV.6 Metodología del modelo de propagación .....	46
IV.7 Resultados de simulación .....	47
IV.7.1 Modelo para terrenos montañosos .....	49
IV.7.2 Modelo para terrenos llanos .....	51
IV.7.3 Comparación con modelos sugeridos por el grupo de trabajo IEEE 802.16 .....	52
IV.8 Viabilidad del modelo .....	55
<b>V. Conclusiones</b> .....	<b>58</b>
V.1 Conclusiones .....	58
V.2 Aportaciones .....	60
V.3 Trabajo a futuro .....	60
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>61</b>

**Contenido (Continuación)**

<b>ANEXOS</b> .....	<b>64</b>
Anexo A. Criterio de banda ancha .....	64
Anexo B. Radio Mobile .....	66
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>67</b>

## Lista de Figuras

Figura	Página
1 Subscriptores de banda ancha por tecnología, diciembre de 2008 .....	1
2 Exponente de pérdidas por trayectoria con respecto a $h_b$ , modelo Erceg .....	22
3 Pérdidas por trayectoria para la banda de 3.3GHz, modelo Erceg .....	23
4 Exponente de pérdidas por trayectoria modelo COST-231 .....	25
5 Pérdidas por trayectoria para la banda de 3.3GHz, modelo COST-231 .....	26
6 Red de la Universidad de Colima .....	32
7 Sitios a integrar a la red Universitaria .....	33
8 Red WiMAX para la Universidad de Colima .....	34
9 Enlaces en terrenos llanos .....	36
10 Enlaces en terrenos montañosos .....	37
11 Climas predominantes de Colima .....	39
12 Clasificación climática mundial según Köppen .....	40
13 Pantalla de resultados del software .....	42
14 Metodología del modelo de propagación .....	46
15 Comportamiento de la clasificación del modelo de propagación propuesto ...	48
16 Comparación de modelos experimentales con el modelo propuesto para terrenos montañosos .....	50
17 Comparación de modelos experimentales con el modelo propuesto para terrenos llanos .....	52
18 Comparación del modelo propuesto para terrenos llanos con los sugeridos por el grupo de trabajo IEEE 802.16 .....	53

## Lista de Figuras (Continuación)

19	Comparación del modelo propuesto para terrenos montañoso con los sugeridos por el grupo de trabajo IEEE 802.16 .....	54
20	Comparación de climas para terrenos llanos .....	56
21	Comparación de climas para terrenos montañosos .....	57

## Lista de Tablas

Tabla		Página
I	Perfiles de certificación WiMAX .....	8
II	Parámetros OFDM usados en WiMAX .....	12
III	Frecuencias WiMAX utilizadas .....	15
IV	Constantes del modelo Erceg .....	21
V	Sitios fuera de la red Universitaria .....	32
VI	Especificaciones técnicas .....	34
VII	Clasificación de Enlaces .....	35
VIII	Parámetros de entrada del software Radio Mobile .....	41
IX	Valor de los parámetros dependiendo el perfil del terreno .....	48
X	Valor de los parámetros de los modelos de referencia .....	49
XI	Parámetros del modelo con respecto al clima, para terrenos llanos .....	55
XII	Parámetros del modelo con respecto al clima, para terrenos montañosos .....	56

# Capítulo I

## Introducción

### I.1 Motivación

En materia de telecomunicaciones, nuestro país sufre un gran rezago en cuanto al ofrecimiento de servicios de banda ancha. De acuerdo con estudios realizados por la OCDE<sup>1</sup> (2008), en México aproximadamente 7 de cada 100 habitantes cuentan con servicio de banda ancha a través de líneas de suscripción digital DSL (*Digital Subscriber Line*), Cable, fibra óptica u otras tecnologías, como se muestra en la figura 1.

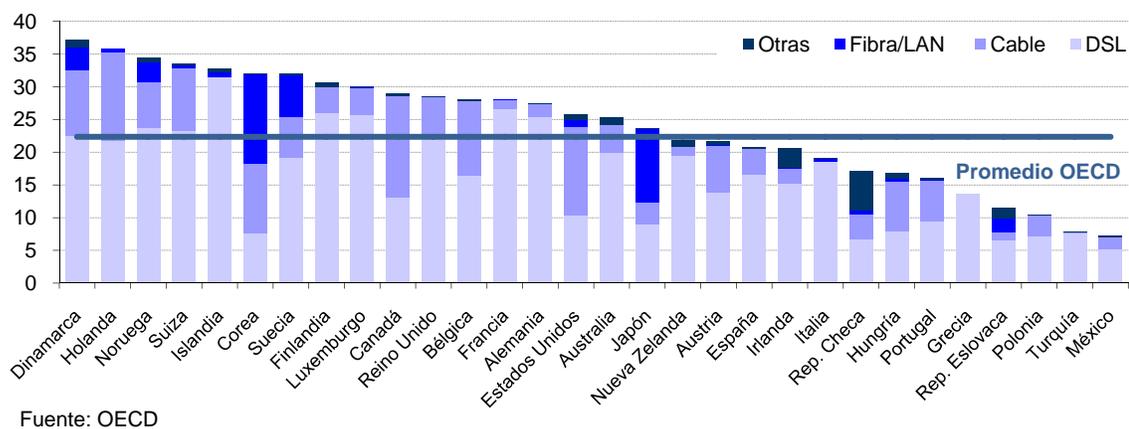


Figura 1. Suscriptores de banda ancha, por tecnología, diciembre de 2008

La tecnología de banda ancha a la que hace referencia la figura 1, considera una velocidad de descarga de al menos 256Kbps, para más detalle ver el Anexo A.

<sup>1</sup> Organisation for Economic Co-Operation and Development

Como una forma de impulsar el crecimiento de acceso a los servicios de banda ancha, México a través de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) y el Sistema Nacional e-México proponen una Agenda de Conectividad, para la puesta en marcha de dos políticas públicas que tienen como elemento central abatir la brecha digital de los Sistemas Nacionales de Educación y Salud, y resolver el problema de la falta de conectividad (e-México SCT, 2008).

El sistema Nacional e-México, es una Política que integra y articula los intereses de los distintos niveles de gobierno, de diversas entidades y dependencias públicas, de los operadores de redes de telecomunicaciones, de las cámaras y asociaciones vinculadas a las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, así como de diversas instituciones, a fin de ampliar la cobertura de servicios básicos como educación, salud, economía, gobierno y ciencia, tecnología e industria, así como de otros servicios a la comunidad (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2002).

A nivel internacional diversos países de América como: Ecuador, Colombia y Chile, así como países de Europa, han implementado la estrategia de crear una Agenda de Conectividad para impulsar el uso y mejora de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC). Diversos elementos conforman el ecosistema de las TIC, incluyendo computadoras, capacitación, aplicaciones públicas y privadas, pero las redes de banda ancha son la base para su desarrollo.

El gobierno de México a través de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, ha propuesto el proyecto de “Redes Estatales, de Educación, Salud y Gobierno”. El cual ve como una posible solución; generar un modelo de agregación de infraestructura entre los tres órdenes de gobierno, para el desarrollo de redes abiertas, para aumentar la cobertura de servicios en forma ordenada, sobre reglas de operación de redes inalámbricas para generar economías a escala, compartir infraestructuras, trabajar en estándares abiertos y hacer uso del espectro radioeléctrico (Hernández Pulido, 2008). La SCT está contribuyendo a través de la Coordinación del Sistema Nacional e-México con los siguientes recursos:

- Una red de fibra con alcance de 100 puntos a nivel nacional.

- Una radiofrecuencia a nivel nacional en la banda de 3.3GHz para servicios de última milla.

El 19 de agosto de 2008, el pleno de la COFETEL<sup>2</sup> resolvió que a la Comisión del Sistema Nacional e-México, le sea asignado un canal de 50MHz a nivel nacional en la banda de frecuencias de 3.3 a 3.4GHz para el proyecto de Redes Estatales de Educación, Salud y Gobierno (e-México SCT, 2008).

Para lograr el objetivo de la Agenda Nacional de Conectividad se requiere que los gobiernos Federales, Estatales y Municipales impulsen las TIC, incluyendo computadoras, capacitación, aplicaciones públicas y privadas, y las redes de banda ancha.

El impulso de redes de banda ancha, se está realizando a través de tecnologías inalámbricas como WiMAX, que permite ofrecer servicios de última generación a centros multimedia, escuelas, colegios, hospitales y hogares. Dentro de las razones por las cuales se considera a esta tecnología como una solución para disminuir los rezagos que se tienen en infraestructura de redes de banda ancha, es la capacidad de proporcionar zonas de mayor cobertura; así como su bajo costo de instalación y la reducción del tiempo de implementación. Siendo las zonas rurales las de mayor beneficio debido a que carecen de la infraestructura necesaria para proporcionar servicios de banda ancha, debido a las condiciones orográficas de las comunidades y los altos costos que genera el poder llevar a las localidades estos servicios a través de fibra óptica o cable.

## I.2 Planteamiento del problema

Como los modelos de propagación para aplicaciones fijas en la banda de 3.3GHz aun no están validados, el problema que se tiene en este trabajo es el determinar un modelo de propagación que permita predecir las pérdidas por trayectoria para dicha frecuencia.

---

<sup>2</sup> Comisión Federal de Telecomunicaciones

### I.3 Objetivo de la tesis

- Diseño de una Red WiMAX para la Universidad de Colima
  - Análisis de modelos de pérdidas por trayectoria para la banda de 3.5GHz.
  - Proponer un modelo de propagación para zonas rurales en la banda de frecuencia de 3.3GHz

### I.4 Alcances y limitaciones

En este trabajo se analizan los modelos de propagación COST-231 y Erceg, así como el tipo de escenarios que maneja cada uno de ellos, los cuales son: urbano y semiurbano para el caso del COST-231, y rurales para el caso del modelo Erceg, el cual dependiendo de las características del terreno y de la densidad de arboles se clasifica en tres diferentes escenarios.

El análisis se realiza con la finalidad de determinar los escenarios adecuados para la deducción del modelo de propagación con respecto al tipo de características que presenta el estado de Colima.

En este trabajo se propone un modelo de propagación para la banda de 3.3GHz para escenarios rurales. Tomando en cuenta que el tipo de terreno en los estudios realizados para la banda de 3.5GHz es llano o poco montañoso, se propone como un alcance de este proyecto la inclusión de un modelo para terrenos montañosos.

El modelo propuesto puede ser utilizado para escenarios de trabajo con condiciones similares a las del estado de Colima. Las pérdidas por trayectoria dependen de varios parámetros como el clima, la frecuencia de operación y el perfil del terreno, siendo esta una limitante del trabajo desarrollado, dado que el modelo no ofrece factores de corrección para dichas variables.

## I.5 Metodología de la Investigación.

Este trabajo de investigación está basado en el análisis bibliográfico de los modelos de propagación para la frecuencia de 3.5GHz. Para el diseño de la red WiMAX propuesta se utilizó el software Radio Mobile para calcular las pérdidas por trayectoria de los enlaces que la conforman. Para la deducción del modelo de propagación, además de utilizar el programa de cálculo de enlaces, se realizó un programa en Matlab para determinar los parámetros que definen el comportamiento del modelo a proponer. El programa diseñado en Matlab toma los datos de las pérdidas por trayectoria arrojados por el software Radio Mobile y los ajusta a una recta utilizando el método de mínimos cuadrados, obteniendo con ello un modelo de propagación teórico para la banda de 3.3GHz. Cada uno de estos pasos es explicado más a detalle en los capítulos III y IV.

## I.6 Organización del trabajo

Este trabajo está dividido en cinco capítulos, el presente capítulo presenta el motivo que lleva a la realización de este proyecto, así como el planteamiento del problema, los objetivos, los alcances y limitaciones de esta investigación. En el capítulo II se exponen las características de la tecnología WiMAX, además de realizar una breve explicación sobre su funcionamiento a nivel de la capa física. En el capítulo III, se realiza un análisis de los modelos de propagación Erceg y COST-231, sugeridos por parte del grupo de trabajo IEEE 802.16 para la banda de 3.5GHz. Se describe también el modelo de ley de potencia, y se plantea la base del modelo de propagación propuesto. El capítulo IV se presenta el diseño de la red WiMAX para la Universidad de Colima, además de describir el procedimiento realizado para obtener los parámetros del modelo de propagación para cada uno de los escenarios de trabajo que se tienen, así como la validación del modelo propuesto con respecto a otras investigaciones. Finalmente en el capítulo V, se presentan las conclusiones generadas, el trabajo a futuro y las aportaciones de esta investigación.

## Capítulo II

---

### WiMAX

---

#### II.1 Introducción

*Worldwide Interoperability Microwave Access* (WiMAX) es una tecnología de acceso inalámbrico que ofrece servicios de banda ancha basada en los estándares del grupo de trabajo de la IEEE 802.16. Esta tecnología ha sido vista como opción viable para ofrecer servicios de última milla, debido a la capacidad de operar en condiciones de línea de vista y sin línea de vista, además de ofrecer coberturas de hasta 50Km, así como el manejo de tasas de transmisión de hasta 74Mbps, todo esto logrado gracias al tipo de tecnología propuesta en los estándares de la IEEE 802.16.

En este capítulo se describe brevemente los antecedentes del estándar, así como los perfiles de certificación propuestos por el foro WiMAX, además de las características que presenta esta tecnología.

#### II.2 Antecedentes del estándar IEEE 802.16 y WiMAX

El grupo de trabajo IEEE 802.16 fue formado en 1998 y es el encargado de desarrollar los estándares para soportar el desarrollo y despliegue de las redes de área metropolitana. Las primeras normas se encuentran definidas en el estándar IEEE 802.16c, el cual considera un sistema inalámbrico punto a multipunto basado en condiciones de línea de vista para operar en la banda de 10-66GHz, usando una capa física basada en la multicanalización por división de frecuencia OFDM (*Orthogonal Frequency Division*

*Multiplexing*). Revisiones posteriores arrojaron un nuevo estándar en el 2004 llamado IEEE 802.16-2004 ó IEEE 802.16d, el cual presenta modificaciones en la capa física, agregando dos nuevos modos de operación; un modo OFDM utilizando una transformada rápida de Fourier FFT (*Fast Fourier Transform*) de 256 puntos, y un modo de acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) con una FFT de 2048 puntos (Wang *et al.*, 2008). En el 2005 el aporte de movilidad al estándar genera la versión IEEE 802.16e ó IEEE 802.16-2005. Las revisiones IEEE 802.16-2004 e IEEE802.16-2005 son las que se recomiendan para ofrecer servicios de banda ancha inalámbrica para usuarios fijos o nómadas y móviles respectivamente.

## II.3 Perfiles de sistema y certificación

Debido al alcance que ofrecen los estándares de la IEEE 802.16 el Foro WiMAX define un número limitado de perfiles de sistema y perfiles de certificación. Un perfil de sistema se define como un subconjunto de características obligatorias y opcionales de la capa de control de acceso al medio (MAC) y de la capa física, seleccionadas por el foro WiMAX de los estándares IEEE 802.16-2004 ó IEEE 802.16-2005. Actualmente, se han definido dos diferentes perfiles de sistema: uno basado en el estándar IEEE 802.16-2004, con capa física OFDM, llamado perfil de sistema fijo; el otro se basa en el estándar IEEE 802.16-2005, con capa física OFDMA escalable, llamado perfil de sistema móvil. Un perfil de certificación es definido como una instancia particular de un perfil de sistema donde se establece la frecuencia de operación, el ancho de banda del canal y el esquema de transmisión (Jeffrey, 2007).

El Foro WiMAX tiene definidos cinco perfiles de certificación para sistemas fijos y catorce perfiles de certificación para sistemas móviles. Por ahora hay dos perfiles para WiMAX fijo con equipos certificados. Estos sistemas operan en la frecuencia de 3.5GHz con un ancho de banda de canal de 3.5MHz, usando el perfil de sistema fijo basado en el estándar IEEE 802.16-2004 con capa física OFDM y con una MAC punto a multipunto.

Uno de los perfiles utiliza FDD (*Frequency Division Duplex*) como esquema de transmisión mientras que el otro utiliza TDD (*Time Division Duplex*). En la tabla I se muestran los perfiles de certificación para WiMAX fijo y WiMAX móvil (Jeffrey, 2007).

Tabla I. Perfiles de certificación WiMAX

Banda de frecuencia	Ancho de banda del canal	Tamaño de FFT OFDM	Esquema de transmisión
<b>Perfiles WiMAX fijo</b>			
<b>3.5GHz</b>	3.5MHz	256	FDD
	3.5MHz	256	TDD
	7MHz	256	FDD
	7MHz	256	TDD
<b>5.8GHz</b>	10MHz	256	TDD
<b>Perfiles WiMAX móvil</b>			
<b>2.3GHz-2.4GHz</b>	5MHz	512	TDD
	10MHz	1024	TDD
	8.75	1024	TDD
<b>2.305GHz-2.320GHz, 2.345GHz-2.360GHz</b>	3.5MHz	512	TDD
	5MHz	512	TDD
	10MHz	1024	TDD
<b>2.496GHz- 2.69GHz</b>	5MHz	512	TDD
	10MHz	1024	TDD
<b>3.3GHz-3.4GHz</b>	5MHz	512	TDD
	7MHz	1024	TDD
	10MHz	1024	TDD
<b>3.4GHz-3.8GHz, 3.4GHz-3.6GHz, 3.6GHz-3.8GHz</b>	5MHz	512	TDD
	7MHz	1024	TDD
	10MHz	1024	TDD

Con el surgimiento del estándar IEEE 802.16e-2005, el interés dentro del foro WiMAX cambio bruscamente hacia el desarrollo y certificación de perfiles de sistemas con aplicaciones móviles basados en este nuevo estándar. Todos los perfiles WiMAX móvil se basan en una capa física escalable OFDMA. Al menos inicialmente, todos los perfiles móviles usaran MAC punto a multipunto. Se debe notar que todos los actuales candidatos a perfiles de certificación móvil están basados en TDD. Aunque TDD a menudo es preferido, los perfiles FDD pueden ser necesitados en un futuro para cumplir con los requisitos de regulación en ciertas bandas (Jeffrey, 2007).

El estándar IEEE802.16, define dos posibles topologías de red; topología punto a multipunto y tipo malla. Aunque las primeras redes desplegadas son planeadas considerando una topología punto a multipunto. La topología malla aún no es parte de un perfil de certificación WiMAX (Nuaymi, 2007).

## II.4 Características WiMAX

WiMAX es vista como una solución de banda ancha inalámbrica que ofrece un abundante conjunto de características con mucha flexibilidad en términos de opciones de despliegue y ofrecimiento de servicios potenciales. Algunas de las características que hacen que WiMAX sea considerada como una opción viable según Jeffrey *et al.* (2007) son las siguientes:

- La capa física de WiMAX está basada en OFDM, un esquema que ofrece buena resistencia a multitrayectorias y permite a WiMAX operar en condiciones sin línea de vista. Proporcionando zonas de cobertura de 50Km con línea de vista y de hasta 8Km sin línea de vista.
- WiMAX es capaz de soportar altas tasas de transmisión, 74Mbps cuando se opera a 20MHz. El logro de altas tasas de transmisión depende de la utilización de esquemas robustos de modulación y de contar con buenas condiciones de señal.
- WiMAX soporta tasa de datos y ancho de banda escalable, esta escalabilidad es soportada en el modo OFDMA, donde el tamaño de la FTT se basa en la disponibilidad del ancho de banda del canal.
- WiMAX maneja codificación y modulación adaptativa AMC (*Adaptive Modulation and Coding*), es decir, dependiendo de las condiciones del canal pueden cambiar los esquemas de modulación y codificación. Así, se provee a un usuario con la mayor tasa de datos posible que puede soportar su respectivo enlace.

- WiMAX soporta solicitud de retransmisión automática ARQ (*automatic retransmission requests*) según se requiera aumentar la confiabilidad de la comunicación.
- IEEE 802.16-2004 e IEEE 802.16-2005, soportan esquemas de transmisión TDD, FDD y *half-duplex* FDD, lo que permite la implementación de un sistema de bajo costo, debido a la flexibilidad de manejar diferentes esquemas de comunicación, siendo el TDD el esquema más utilizado por la simplicidad en el diseño del transceptor.
- WiMAX móvil utiliza OFDM como técnica de acceso múltiple, por lo tanto se pueden asignar diferentes usuarios a distintos subconjuntos de tonos OFDM.
- Permite el uso de técnicas de arreglos de antenas, tales como *beamforming*<sup>3</sup>, codificación espacio-tiempo y multicanalización espacial.
- Soporta calidad de servicio. La capa MAC WiMAX tiene una arquitectura orientada a conexión que está diseñada para soportar una variedad de aplicaciones, incluyendo servicios de voz y multimedia.

## II.5 Capa física WiMAX

La capa física de WiMAX se basa en el esquema de transmisión de multicanalización por división de frecuencias ortogonales. OFDM es el esquema de transmisión elegido para permitir alta velocidad de datos, video y comunicaciones multimedia, y es usado por una variedad de sistemas de banda ancha comerciales, incluyendo DSL, Wi-Fi, DVB-H (*Digital Video Broadcasting-Handheld*) y MediaFLO (*Media Forward Link Only*), además de WiMAX. OFDM es un esquema eficiente para altas tasas de transmisión en ambientes de radio sin línea de vista o multitrayectoria (Jeffrey, 2007).

---

<sup>3</sup> Técnica usada para ajustar la intensidad de la señal transmitida o recibida en base a la dirección de antenas.

## II.5.1 Fundamentos de OFDM

OFDM pertenece a una familia de esquemas de transmisión llamada modulación por multiportadora, la cual está basada en la idea de dividir una cadena de datos de alta tasa de bits en varias cadenas paralelas de baja tasa de bits y modular cada cadena en portadoras separas, a menudo llamadas subportadoras o tonos. Los esquemas de modulación por multiportadora eliminan o minimizan la interferencia entre símbolos haciendo el tiempo del símbolo lo suficientemente mayor tal que el retardo del canal inducido sea una fracción insignificante de la duración del símbolo. Por lo tanto, en sistemas de altas tasas de datos en los cuales la duración del símbolo es pequeña, como esta es inversamente proporcional a la tasa de datos, se divide la cadena de datos en muchas cadenas paralelas incrementando así la duración del símbolo de cada cadena tal que el esparcimiento por retardo es solo una pequeña fracción de la duración del símbolo (Jeffrey, 2007).

## II.5.2 Parámetros OFDM en WiMAX

Las versiones de WiMAX fijo y móvil tienen diferentes implementaciones de la capa física OFDM. WiMAX fijo está basado en el estándar IEEE 802.16-2004, con una capa física OFDM basada en una FFT de 256 bits. WiMAX móvil está basado en el estándar IEEE 802.16-2005 usando una capa física basada en OFDMA escalable. En el caso de WiMAX móvil el tamaño de la FFT puede variar desde 128 a 2048 bits (Jeffrey, 2007). La tabla II muestra los parámetros OFDM relacionados para la capa física OFDM y para la capa física OFDMA.

La capa física OFDM para WiMAX fijo mantiene una FFT fija de 256 subportadoras, de las cuales 192 son usadas para datos, 8 son utilizadas como piloto para propósitos de sincronización y estimación del canal, y el resto se utiliza como banda de guarda. Como el tamaño de la FFT es fijo, el espaciamiento de las subportadoras varía con respecto al ancho del canal. Cuando se usa un mayor ancho de banda, el espaciamiento de las subportadoras incrementa, y el tiempo del símbolo disminuye. Disminuir el tiempo del

símbolo implica que una fracción mayor necesita ser asignada como tiempo de guarda para reducir el esparcimiento por retardo. Como lo muestra la tabla II WiMAX permite una amplia variedad de tiempos de guarda que permite a los diseñadores de sistema hacer las apropiadas compensaciones entre eficiencia espectral y robustez en el esparcimiento por retardo. Para una máxima robustez en el esparcimiento por retardo, un 25 por ciento en el tiempo de guarda puede ser usado, el cual puede tener un esparcimiento por retardo de hasta  $16\mu\text{s}$  cuando se opera en un canal de  $3.5\text{MHz}$  y hasta  $8\mu\text{s}$  cuando se opera en un canal de  $7\text{MHz}$  (Jeffrey, 2007).

Tabla II. Parámetros OFDM usados en WiMAX

Parámetro	OFDM-PHY WiMAX fijo	OFDMA-PHY escalable, WiMAX móvil			
Tamaño de FFT	256	128	512	1024	2048
Número de subportadoras de datos	192	72	360	720	1440
Número de subportadoras piloto	8	12	60	120	240
Número de subportadoras de banda de guarda	56	44	92	184	368
Prefijo cíclico o tiempo de guarda	1/32, 1/16, 1/8, 1/4				
Ancho de banda del canal (MHZ)	3.5	1.25	5	10	20
Espaciamiento de frecuencia de subportadoras (KHz)	15.625	10.94			
Tiempo del símbolo útil ( $\mu\text{s}$ )	64	91.4			
Tiempo de guarda asumiendo 12.5% ( $\mu\text{s}$ )	8	11.4			
Duración de símbolo OFDM ( $\mu\text{s}$ )	72	102.94			
Número de símbolos OFDM en tramas de 5ms	69	48			

La capa Física OFDMA para WiMAX móvil, utiliza una FFT escalable desde 128 hasta 2048 subportadoras. Cuando el ancho de banda disponible incrementa, el tamaño de la FFT también aumenta, tal que el espaciamiento entre subportadoras es siempre  $10.94\text{KHz}$ . Esto mantiene la duración del símbolo OFDM fijo, y por lo tanto hace que el

escalamiento tenga un mínimo impacto en capas superiores. Un diseño escalable también mantiene los bajos costos. El espaciamiento de 10.94KHz fue elegido como un buen balance para satisfacer los requerimientos entre el esparcimiento por retardo y esparcimiento Doppler para operar en ambientes fijos y móviles. Este espaciamiento de subportadoras puede soportar valores de esparcimiento por retardo de hasta 20 $\mu$ s y una movilidad vehicular de hasta 125Kmph cuando opera en la banda de 3.5GHz. Un espaciamiento de subportadoras de 10.94KHz implica que la FFT de 128, 512, 1024 y 2048 sean utilizadas cuando el ancho de banda del canal es de; 1.25MHz, 5MHz, 10MHz y 20MHz, respectivamente (Jeffrey, 2007).

### II.5.3 Subcanalización OFDMA

Las subportadoras disponibles pueden ser divididas en varios grupos de subportadoras llamados subcanales. WiMAX fijo basado en la capa física OFDM permite una forma limitada de subcanalización solo en el enlace de subida. El estándar define 16 subcanales, donde 1, 2, 4, 8 o todos los subconjuntos pueden ser asignados a estaciones subscriptoras en el enlace de subida. La subcanalización en el enlace de subida en WiMAX fijo permite a las estaciones subscriptoras transmitir usando solo una fracción del ancho de banda asignado a ellas por la estación base, lo cual proporciona mejoras en el presupuesto de enlace que pueden ser usadas para aumentar el alcance y/o mejorar la vida útil de la batería de la estación subscriptora. Un factor de 1/16 proporciona un aumento de presupuesto de enlace de 12dB (Jeffrey, 2007).

WiMAX móvil basado en la capa física OFDMA, permite subcanalización en el enlace de subida y en el enlace de bajada, los subcanales forman la unidad de recurso de frecuencia mínima asignada por la estación base. Por lo tanto diferentes subcanales pueden ser asignados a diferentes usuarios como un mecanismo de acceso múltiple. Este tipo de esquemas de múltiple acceso es llamado acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal OFDMA, el cual da su nombre a la capa física de WiMAX móvil (Jeffrey, 2007).

Los subcanales pueden ser constituidos usando otras subportadoras contiguas o subportadoras distribuidas pseudoaleatoriamente a través del espectro de frecuencia. Los subcanales formados usan subportadoras distribuidas para proporcionar mayor diversidad de frecuencia, la cual es particularmente útil para aplicaciones móviles. WiMAX define varios esquemas de subcanalización basados en portadoras distribuidas para los enlaces de subida y de bajada. El esquema de subportadoras de uso parcial PUSC (*Partial Usage of Subcarrier*), es obligatorio para todas las implementaciones móviles. El perfil inicial de WiMAX define de 15 y 17 subcanales para el enlace de bajada y el enlace de subida, respectivamente, para PUSC que operan en canales de 5MHz. Para canales de 10MHz, los canales son de 30 y 35 respectivamente (Jeffrey, 2007).

El esquema de subcanalización basado en subportadoras contiguas en WiMAX es llamado banda de codificación y modulación adaptativa AMC. Aunque se pierde diversidad en frecuencia la banda AMC permite a los diseñadores explotar la diversidad multiusuario, asignando subcanales a los usuarios basándose en su respuesta en frecuencia. La diversidad multiusuario puede proporcionar una ganancia importante en toda la capacidad del sistema, si el sistema procura dar a cada usuario un subcanal que maximice su relación señal a ruido mas interferencia SINR (*signal to interference plus noise ratio*) recibida. En general los subcanales contiguos son más adecuados para aplicaciones fijas y móviles (Jeffrey, 2007).

## II.6 Bandas de operación WiMAX

Las bandas de frecuencia que se han considerado para el uso de WiMAX en distintos países son:

- Bandas bajo licencia: 2.3GHz, 2.5GHz, 3.3GHz y 3.5GHz, siendo esta última la más utilizada.
- Bandas libres: dentro de la banda de 5GHz, en el 2004 el perfil fijo considera la banda de 5.8GHz. En un futuro se prevé que varias bandas entre 5GHz y 6GHz puedan ser usadas para WiMAX libre.

Países como Francia y Reino Unido ya cuentan con operadores que brindan servicios de banda ancha a través de WiMAX en las bandas de 3.4GHz y 3.5GHz, mientras que en USA y Corea se ofrecen estos servicios en las bandas de 2.3GHz - 2.4GHz, solo que en Corea la tecnología recibe el nombre de WiBro (Nuaymi, 2007).

En México se ha dispuesto utilizar la banda de 3.3GHz para aplicaciones gubernamentales y la banda de 3.5GHz está reservada para ofrecer los servicios comercialmente.

En la tabla III (Nuaymi, 2007), se muestra la distribución de frecuencias para WiMAX de acuerdo a cada región o país.

Tabla III. Frecuencias WiMAX utilizadas

<b>Región o País</b>	<b>Bandas de frecuencia WiMAX reportadas</b>
<b>USA</b>	2.3, 2.5 y 5.8 GHz
<b>Centro y Sur América</b>	2.5, 3.5 y 5.8 GHz
<b>Europa</b>	3.5 y 5.8 GHz, posiblemente 2.5 GHz
<b>Sureste de Asia</b>	2.3, 2.5, 3.3, 3.5 y 5.8 GHz
<b>Oriente Medio y África</b>	3.5 y 5.8 GHz

Las compañías miembros del foro WiMAX están trabajando para desarrollar perfiles normalizados y productos WiMAX interoperables en las bandas de 2.3GHz, 2.5GHz, 3.5GHz y 5.8GHz.

En cuanto a los modelos de propagación para las bandas de frecuencia disponibles en WiMAX el grupo de trabajo de la IEEE 802.16 propone la extensión de algunos modelos como el COST-231 y la clasificación de escenarios realizada por Erceg, sin embargo debido a que estos modelos fueron deducidos para frecuencias menores a los 2GHz, su validez para bandas superiores no ha quedado establecida, en particular en la frecuencia de 3.5GHz de acuerdo con los trabajos realizados por Abhayawardhana *et al.* (2005) e Imperatore *et al.* (2007). Además la banda de operación de la red WiMAX diseñada para la Universidad de Colima es de 3.3GHz, dado que las pérdidas por

trayectoria dependen de la frecuencia de operación, en este trabajo se propone un modelo de propagación para ésta frecuencia basado en las investigaciones realizadas en la banda de 3.5GHz.

## Capítulo III

---

### Modelos de propagación

---

#### III.1 Introducción

Para el diseño de cualquier red inalámbrica, es importante contar con un modelo de predicción de pérdidas por trayectoria que permita conocer el comportamiento de la onda electromagnética en un ambiente de propagación dado. Para escenarios móviles y frecuencias celulares, hay una gran cantidad de modelos que pueden predecir dichas pérdidas. Fuera del intervalo de frecuencias celulares existe una gran carencia de modelos de predicción de pérdidas por trayectoria para aplicaciones inalámbricas fijas. WiMAX es una tecnología que opera fuera de dichas frecuencias, por lo tanto los modelos existentes no tienen validez en la banda de 3.5GHz. El grupo de trabajo de la IEEE 802.16 ha propuesto algunos modelos de propagación basados en modelos ya existentes, agregando factores de corrección que permitan ampliar su validez en un mayor intervalo de frecuencias; tal es el caso del modelo Erceg. En este capítulo se presentan dos de los modelos propuestos por el grupo de trabajo de la IEEE 802.16, así como un modelo general el cual ha sido utilizado para deducir modelos empíricos de pérdidas por trayectoria en la banda de 3.5GHz, siendo este último, la base para el modelo que se busca proponer para trabajar según las condiciones de los escenarios en el estado de Colima.

### III.2 Ambientes de propagación

Entre el transmisor y el receptor, el canal inalámbrico se modela por varios parámetros claves. Algunos parámetros son: el tipo de terreno, el clima, altura de las antenas, etc.; los cuales varían significativamente dependiendo del tipo de escenario que se tenga; rural, urbano, llanos, montañosos o la combinación de ellos.

Diferentes bandas del espectro tienen características distintas de propagación y requieren modelos de predicción adecuados. Algunos modelos de propagación son apropiados para simulación computacional cuando se cuenta con las bases de datos del perfil del terreno y del tipo de construcciones; otros apuntan a proveer simples estimaciones generales de las pérdidas por trayectoria (Schwengler, 2008).

Para comunicaciones móviles celulares una gran variedad de modelos ha sido ampliamente aceptada, su éxito se debe principalmente a su simplicidad y su buena predicción para el primer orden de modelado. Estos modelos consisten en estimar la relación de potencia entre el transmisor y receptor como una función de la distancia de separación. Un ejemplo de estos modelos es la fórmula de potencia de Friis (Schwengler, 2008):

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (1)$$

donde  $P_t$  y  $P_r$  son la potencia transmitida y potencia recibida,  $G_t$  y  $G_r$  son la ganancia del transmisor y receptor,  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal, y  $d$  es la distancia de separación del enlace. La ecuación 1 muestra una dependencia inversamente proporcional a la distancia en  $1/d^2$ . Al exponente de la ecuación 1 al cual llamaremos  $\gamma$  y que en este caso es igual a dos, se refiere al exponente de pérdidas por trayectoria. Si estas son medidas en decibeles ( $PL = 10 \times \log P_t/P_r$ ) varían logarítmicamente con respecto a la distancia de separación.

### III.3 Acceso de banda ancha fija

Ya que el enfoque del presente trabajo es el acceso de banda ancha inalámbrico, se debe enfatizar que los modelos de propagación de un enlace de radio fijo, tienen algunas diferencias fundamentales con las de un enlace móvil.

El problema de colección de datos fijos para un modelo empírico no es trivial; y muchos experimentos presentan métodos para promediar datos localmente para eliminar el desvanecimiento a pequeña escala debido a multitrayectorias. La precisión para cuantificar el desvanecimiento a pequeña escala es difícil, y aún con un gran número de datos se provee un muestreo insuficiente para evaluar el impacto del desvanecimiento (Schwengler, 2008).

Otro problema importante es el ancho del haz de la antena. La colección de datos móviles es realizada usando una antena omnidireccional la cual tiene bien conocido el ancho del haz de la antena a cierta distancia, y más específicamente la distribución de los ángulos de arribo con respecto a la dirección de movimiento de un móvil, estos parámetros importantes cuantifican el desvanecimiento de un enlace móvil (Schwengler, 2008).

Consecuentemente, los modelos de datos fijos pueden diferir en algunos casos de los modelos empíricos usuales. Una contribución del grupo de trabajo IEEE 802.16 analiza estos detalles y propone modelos basados en una gran campaña de datos PCS<sup>4</sup> y modelos asociados (Schwengler, 2008).

### III.4 Modelos de propagación

Los modelos de propagación se usan ampliamente en la planeación de redes, particularmente para tener un estudio viable durante el despliegue inicial de una red. Estos modelos se clasifican en tres tipos: empíricos, determinísticos y estocásticos. Los modelos

---

<sup>4</sup> PCS es el acrónimo de Personal Communication Services y es el nombre utilizado para referirse a los servicios de telefonía móvil digital en la banda de 1900MHz en USA, Canadá y México.

empíricos están basados solamente en observaciones y mediciones. Los modelos determinísticos hacen uso de las leyes de propagación de ondas electromagnéticas para determinar la potencia de señal recibida en un lugar particular. Los modelos estocásticos por otro lado modelan el ambiente como una serie de variables aleatorias. Estos modelos son los menos exactos ya que requieren menor información (Abhayawardhana *et al.*, 2005).

Los modelos empíricos pueden ser divididos en dos categorías a saber, dispersos en el tiempo y no dispersos en el tiempo. El primer tipo está diseñado para proporcionar información relacionada a las características de dispersión del canal en el tiempo, por ejemplo; las multitrayectorias y esparcimiento por retardo del canal. Un ejemplo de este tipo son los modelos de canal Stanford University Interim (SUI), desarrollados con el grupo de trabajo del IEEE 802.16. Por mencionar algunos ejemplos de modelos empíricos no dispersos en el tiempo tenemos: los de la ITU-R, y el modelo Hata COST-231 (Abhayawardhana *et al.*, 2005).

### III.4.1 Modelo de Erceg.

El modelo Erceg también se conoce como modelo SUI, debido a que está basado en investigaciones realizadas por la Universidad de Stanford. Este modelo fue diseñado para considerar tres tipos de escenarios rurales. El primer escenario llamado tipo A, está caracterizado por ser un terreno montañoso con densidad de árboles de moderada a alta, siendo este escenario el que presenta mayor pérdida por trayectoria. La clasificación tipo C, es peculiar de terrenos llanos con densidad de árboles baja, este escenario es el que ofrece menores pérdidas por trayectoria. La categoría intermedia es el tipo B el cual es representado por terrenos llanos con una densidad alta de árboles o terrenos montañosos con una densidad baja de árboles.

Inicialmente Erceg propuso su modelo para trabajar en la banda de 1.9GHz el cual está descrito por la ecuación 2 (Erceg *et al.*, 1999)

$$PL[dB] = A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2)$$

donde  $A = 20 \log \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)$  siendo  $\lambda$  la longitud de onda,  $d_0 = 100m$ ,  $\gamma$  es el exponente de pérdidas por trayectoria, el cual está dado por la ecuación 3, y  $X_\sigma$  es un factor de distribución lognormal que se usa para explicar el desvanecimiento por sombreado propio de los árboles y otro tipo de clutter<sup>5</sup>, este puede tomar los valores de 10.6, 9.6 y 8.2 dependiendo del tipo de terreno: A, B, o C respectivamente (Erceg *et al.*, 1999).

$$\gamma = a - bh_b + c/h_b \quad (3)$$

En la ecuación 3,  $h_b$  es la altura de la estación base y debe de estar comprendida entre 10m y 80m; a, b y c son constantes dependientes de la categoría del escenario considerado para el modelo, su valor se encuentra en la tabla IV.

Tabla IV. Constantes del modelo Erceg.

Constante	Tipo A	Tipo B	Tipo C
<b>a</b>	4.6	4	3.6
<b>b (m<sup>-1</sup>)</b>	0.0075	0.0065	0.005
<b>c (m)</b>	12.6	17.1	20

El valor de  $\gamma$  depende de las características del terreno que se tengan (valores de a, b y c de acuerdo a la tabla IV), y de la altura de la antena de la estación base.

En la figura 2 se muestra la dependencia del exponente de pérdidas por trayectoria con respecto a la altura de la antena, en la gráfica se puede observar como a medida que  $h_b$  aumenta el valor de  $\gamma$  disminuye.

Para el caso en que la altura de la antena es de 25 metros, el valor de  $\gamma$  para el terreno tipo A es de 4.91, este es el terreno que ofrece mayores pérdidas por trayectoria, para el terreno tipo B el valor de  $\gamma$  es 4.52, y para el terreno C, el valor de  $\gamma$  es 4.27 siendo este el terreno que ofrece menores pérdidas por trayectoria. En general para cualquiera de

<sup>5</sup> El término Clutter se utiliza para referirse al tipo de construcciones características de un área en común

los tres tipos de terrenos que presenta este modelo el valor de  $\gamma$  está dentro del intervalo de 4 a 5 si  $h_b$  está entre los 20 y 40m.

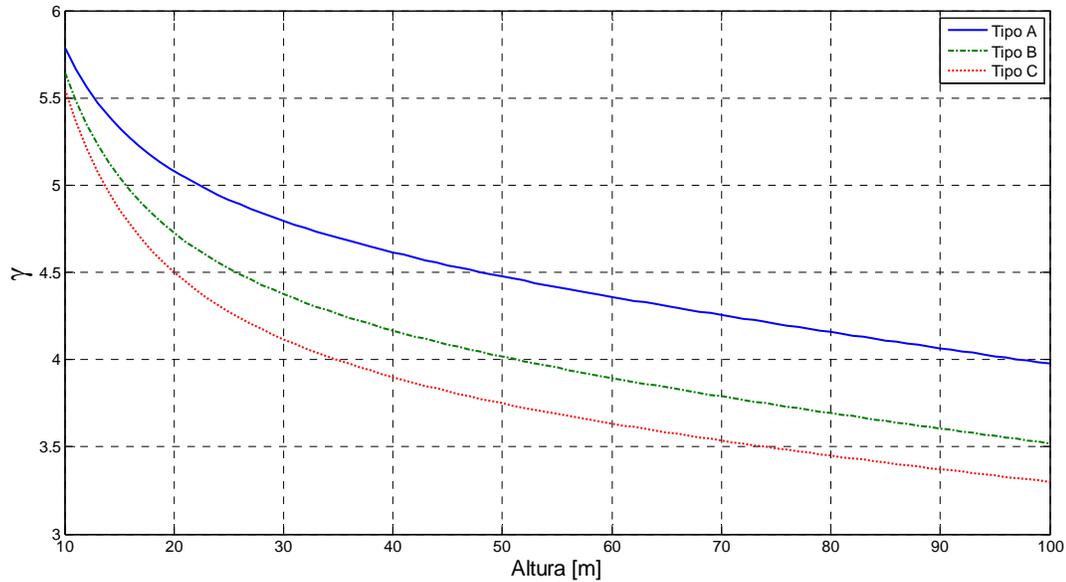


Figura 2. Exponente de pérdidas de trayectoria con respecto a  $h_b$ , modelo Erceg.

El exponente de pérdidas por trayectorias es importante debido a que representa la pendiente del modelo de propagación, entre mayor sea su valor, las pérdidas incrementaran más rápido conforme aumente la distancia entre los enlaces.

Para extender el uso del modelo Erceg a frecuencias mayores a 2GHz se incluyeron dos factores de corrección a la ecuación 2; quedando escrita como se muestra en la ecuación 4 (Erceg et al., 2001):

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma} + X_f + X_h \quad (4)$$

El factor de corrección para la frecuencia de operación  $X_f$ , y el factor para incrementar la altura de las antenas CPE  $X_h$ , están representados por las ecuaciones 5 y 6 respectivamente.

$$X_f = 6 \log_{10} (f/2000) \quad (5)$$

$$X_h \begin{cases} -10.8 \log_{10}(h_m/2) & \text{tipo A, B} \\ -20 \log_{10}(h_m/2) & \text{tipo C} \end{cases} \quad (6)$$

donde  $f$  es la frecuencia en MHz y  $h_m$  la altura de la antena CPE la cual puede estar entre 2m y 10m.

Las pérdidas por trayectoria estimadas para cada uno de los escenarios propuestos por el modelo Ercege en la banda de 3.3GHz, se muestran en la figura 3.

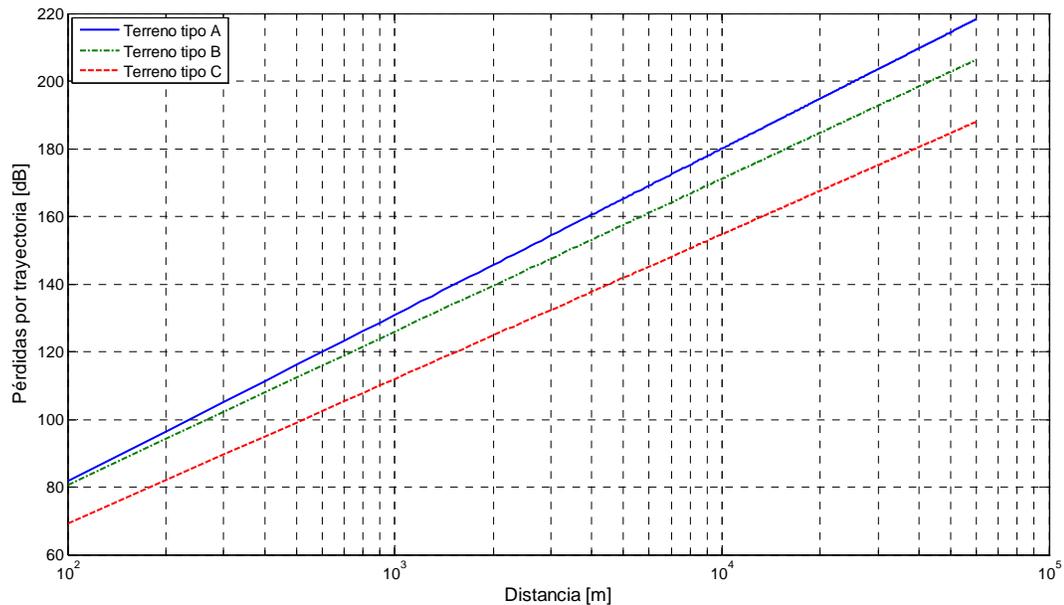


Figura 3. Pérdidas por trayectoria para la banda de 3.3GHz, modelo Ercege

Para distancias menores a 1Km las pérdidas por trayectoria estimadas por el modelo Ercege para los escenarios A y B son similares, por lo que se podría considerar un solo modelo para estos dos escenarios cuando la distancia de los enlaces es menor a los 1000m, después de los 1000m es notoria la necesidad de contar con la clasificación realizada del modelo. El terreno tipo C, desde un principio presenta pérdidas por trayectoria por debajo de los otros dos escenarios.

### III.4.2 Modelo Hata COST-231

El modelo COST-231 se utiliza ampliamente para predecir pérdidas por trayectoria en sistemas inalámbricos móviles y a su vez se ha visto como una alternativa para aplicaciones fijas en la banda de 3.5GHz. Este modelo fue concebido como una extensión del modelo Hata-Okumura y está diseñado para ser usado en la banda de frecuencias de 500MHz a 2000MHz. El modelo incluye correcciones para ambientes urbanos, suburbanos y rurales. Sin embargo, su intervalo de frecuencia está fuera de la banda de operación WiMAX (Abhayawardhana, 2005).

La ecuación de pérdidas por trayectoria que describe el modelo COST-231 está dada por (Abhayawardhana, 2005):

$$PL = 46.3 + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b) \log_{10} d - 13.82 \log_{10} h_b - a_m + c_m + 33.9 \log_{10} f \quad (7)$$

donde  $d$  es la distancia de la estación base a la receptora en Km,  $f$  es la frecuencia en MHz,  $h_b$  y  $h_m$  son la altura de la estación base y la estación receptora respectivamente. El término de corrección  $c_m$ , está definido como 0dB en ambientes abiertos o suburbanos y como 3dB para ambientes urbanos. El parámetro  $a_m$  está definido para ambientes urbanos por la ecuación 8 (Abhayawardhana, 2005):

$$a_m = 3.20(\log_{10} 11.75h_m)^2 - 4.97 \quad (8)$$

y para ambientes suburbanos o rurales está definido por la ecuación 9:

$$a_m = (1.1 \log_{10} f - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10} f - 0.8) \quad (9)$$

Renombrando los términos de la ecuación 7 esta puede ser escrita como:

$$PL[dB] = A + 10\gamma \log_{10} d/d_0 + \chi_c \quad (10)$$

donde  $A = 46.3$ ,  $d$  es la distancia de la estación base al receptor en metros,  $d_0 = 1000m$ , y los términos  $\gamma$  y  $\chi_c$  están dados por la ecuación 11 y 12 respectivamente:

$$\gamma = (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b)/10 \quad (11)$$

$$\chi_c = -13.82 \log_{10} h_b - (1.1 \log_{10} f - 0.7)h_m + 35.46 \log_{10} f - 0.8 \quad (12)$$

Como se puede observar en la ecuación 11, el exponente de pérdidas por trayectoria queda en dependencia de la altura de la antena de la estación base  $h_b$ . En la figura 4, se ve como el valor de  $\gamma$  disminuye conforme la altura de la antena aumenta. Si  $h_b = 25\text{m}$ , el valor del exponente de pérdidas por trayectoria es de 3.57.

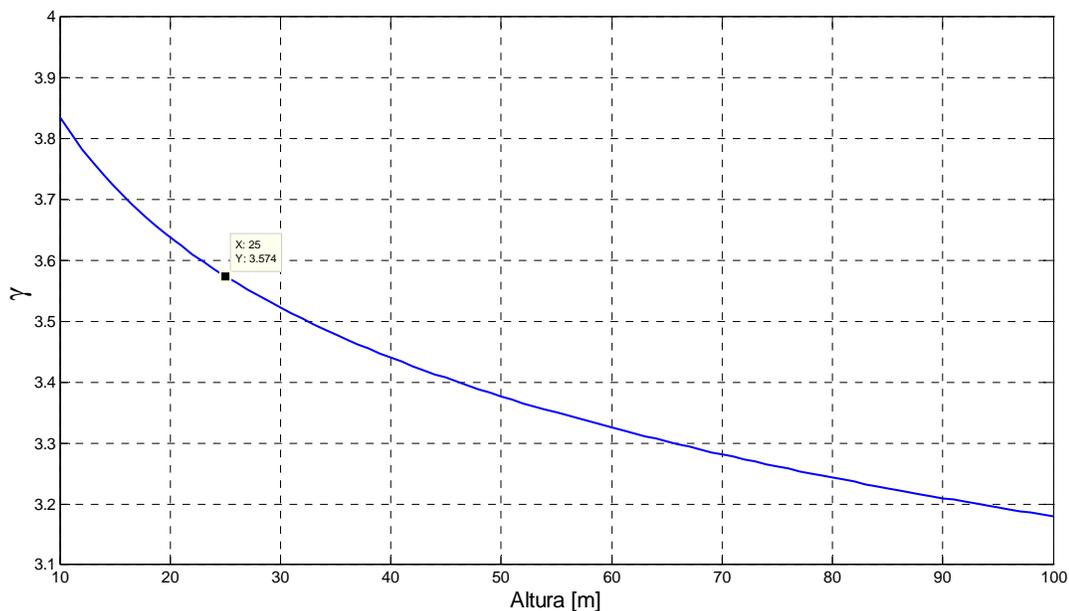


Figura 4. Exponente de pérdidas por trayectoria modelo COST-231

La tendencia de las pérdidas por trayectoria para la banda de 3.3GHz para este modelo está representada por la gráfica de la figura 5, la cual muestra el comportamiento de los dos escenarios que considera el modelo COST-231, urbano y semiurbano.

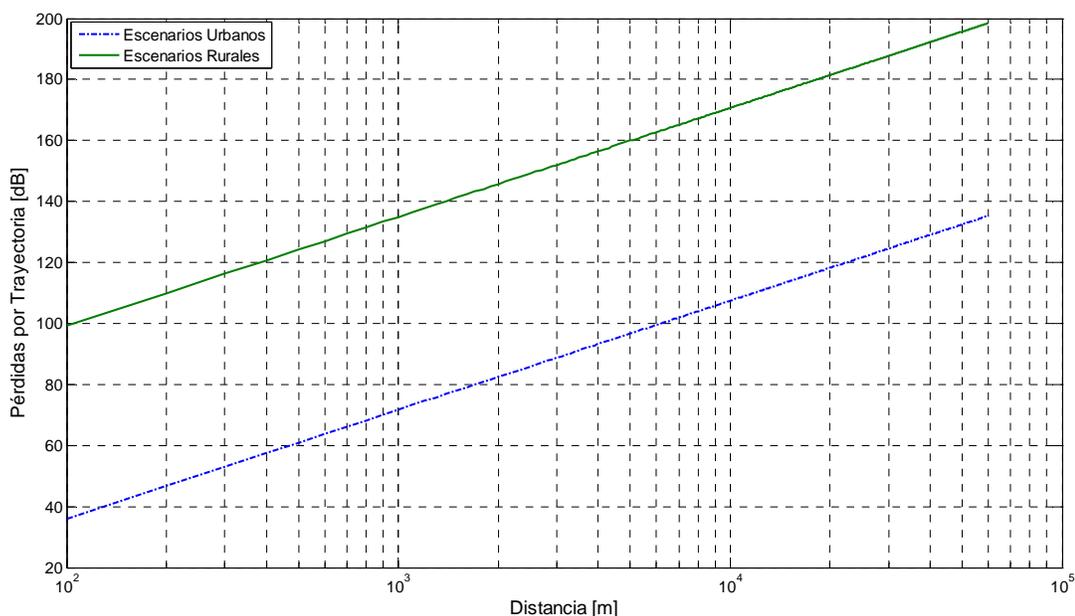


Figura 5. Pérdidas por trayectoria para la banda de 3.3GHz, modelo COST-231

En la gráfica de la figura 5, se observa que las pérdidas por trayectoria para escenarios rurales son mayores que en lugares urbanos. Esto muestra que una señal electromagnética sufre una mayor atenuación en escenarios rurales, ya que una señal a través de zonas boscosas sufre una mayor degradación que a lo largo de zonas edificadas, debido a la vegetación y a las condiciones de humedad que se presentan (UIT-R P.833-5, 2005)

En los estudios realizados por Abhayawardhana *et al.*, (2005) e Imperatore *et al.*, (2007) se ha analizado la viabilidad de los modelos Erceg y COST-231 en la banda de 3.5GHz, sin embargo no ha quedado plenamente establecida.

### III.4.3 Modelos en Ley de Potencia.

Los modelos empíricos a menudo son desarrollados usando datos experimentales, de los más simples y comunes son los que están fundamentados en la Ley de Potencia.

$$PL = P_t P_0 \left( \frac{d}{d_0} \right)^\gamma \quad (13)$$

En la ecuación de Ley de Potencia se agrupan varios efectos en dos parámetros: el exponente de pérdidas por trayectoria  $\gamma$  y la medición de pérdida por trayectoria  $P_0$  a una distancia de referencia  $d_0$ , la cual es a menudo elegida a un metro, sin embargo,  $P_0$  debería de ser determinado de las mediciones, con una buena aproximación (dentro de varios dB), simplemente como  $(4\pi/\lambda)^2$  cuando  $d_0 = 1$ . Esta sencilla fórmula empírica de pérdidas por trayectoria es capaz de representar razonablemente gran parte de las importantes tendencias de pérdidas por trayectoria con solo dos parámetros, por lo menos sobre algún intervalo de interés (Jeffrey *et al.*, 2007), como lo muestran diversos modelos que han sido deducidos a través de la ecuación 13, tal es caso del modelo Erceg y el modelo COST-231.

Al reescribir la ecuación 13 para obtener las pérdidas en dB se observa la similitud con las ecuaciones que describen cada uno de dichos modelos.

$$PL = P_0 + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (14)$$

Donde los parámetros  $P_0$  y  $\gamma$  se describen en cada modelo de acuerdo a las condiciones de operación.

Para las pérdidas en el espacio libre el exponente de pérdidas por trayectoria es igual a 2, y este varía dependiendo de las condiciones del terreno, así como de la altura de las antenas, regularmente  $\gamma$  se representa como dependiente de la altura de la estación base. El exponente de pérdidas por trayectoria  $\gamma$  es importante ya que muestra la tasa de incremento de las pérdidas por trayectoria con respecto a la distancia.

Los modelos empíricos simples entonces consisten en calcular un exponente de pérdidas  $\gamma$ , a través de una regresión lineal ajustando un conjunto de datos y derivando el modelo como la ecuación 14. Tales modelos son referidos como modelos empíricos *one-slope* y son innumerables en la literatura (Schwengler, 2008).

El seguimiento de los modelos *one-slope* para un cierto escenario de propagación, puede generar múltiples exponentes de pérdidas por trayectoria. La utilización y análisis de

los exponentes provee algunas mejoras de predicción en ambientes interiores con altas multitrayectorias. Sin embargo las variaciones de sitio a sitio son tales que las mejoras en estos modelos son bastante pequeñas, por lo tanto, los modelos simples de *one-slope* son una buena aproximación de modelos de propagación exterior. Para mejores resultados se requieren más detalles para sitios específicos, pero requieren un esfuerzo adicional y datos de terreno o construcciones en forma más específica (Schwengler, 2008).

### III.4.4 Modelos de propagación WiMAX para la banda de 3.5GHz

El conocimiento de las pérdidas por trayectoria en la banda de 3.5GHz está menos avanzado con respecto a lo acumulado para las frecuencias usadas en aplicaciones celulares. Además, son limitadas las publicaciones relacionadas con el modelo de propagación para aplicaciones inalámbricas fijas en la banda de 3.5GHz (Imperatore *et al*, 2007).

Los niveles de funcionamiento WiMAX en diferentes ambientes deben ser cuantificados aún cuando los ambientes de propagación no están especificados para WiMAX. Esta cuantificación se ha realizado para algunas localidades de Italia e Inglaterra, las cuales presentan un modelo de propagación de acuerdo a las características que tiene cada escenario, basado en el modelo de Ley de Potencias. Las ecuaciones que describen estos modelos son las siguientes:

$$PL = 103.3 + 10 * 2.5 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (15)$$

$$PL = 110 + 10 * 2.13 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (16)$$

La ecuación 15, representa el modelo de propagación para la localidad de Piemonte Italia, mientras que la ecuación 16, describe las pérdidas por trayectoria para Cambridge Inglaterra. En ambos casos se tenía un escenario rural con un perfil de terreno llano y con una distancia de enlaces de 10Km y 5Km respectivamente.

Los modelos de predicción empíricos disponibles se enfocan a diferentes intervalos de frecuencia y no está clara su extensión para el intervalo de 3.5GHz. Además los pocos experimentos disponibles en el estudio de pérdidas por trayectoria en la banda de 3.5GHz analizan escenarios limitados o son restringidos por intervalos de cobertura limitada, así que el ambiente macrocelular rural no está completamente caracterizado aún en la banda de 3.5GHz.

### III.4.5 Propuesta de modelo de propagación para la banda de 3.3GHz

Como se ha explicado en la sección III.4.3, la mayoría de los modelos de propagación están basados en el modelo de Ley de potencias debido a su sencillez y a la buena predicción de pérdidas por trayectoria que este ofrece. Por lo tanto, el modelo de predicción de pérdidas que se propone en este trabajo al igual que en los modelos experimentales para la banda de 3.5GHz está basado en la ecuación 14.

$$PL = P_0 + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

El objetivo ahora es determinar los parámetros  $\gamma$  y  $P_0$  los cuales caracterizan el modelo de propagación con respecto a las condiciones de cada escenario.

Tanto  $\gamma$  como  $P_0$  serán determinados en función: de la frecuencia de operación, de la rugosidad del terreno, altura de las antenas, densidad de árboles y condiciones ambientales de la zona. En el siguiente capítulo se analiza la consideración de estos factores para la determinación de los variables  $\gamma$  y  $P_0$  para el modelo de propagación en la banda de 3.3GHz, dependiendo de los escenarios que se tengan.

### III.5 Conclusiones

Sobre los modelos de propagación se deben mantener en mente dos importantes puntos. El primero es que los datos para los modelos empíricos como el propuesto por Erceg y el COST-231, fueron colectados en frecuencias para uso celular y PCS (800 y 1900 MHz), y la extensión a otras frecuencias puede no haber sido bien verificada. El segundo es que los datos fueron colectados de antenas móviles, por lo tanto la información recolectada puede que no refleje el comportamiento presentado por los enlaces inalámbricos fijos.

Los estudios de modelos de propagación para la banda de 3.3-3.5 GHz para aplicaciones fijas aún son muy limitados. Esto se debe a que la mayoría de las redes inalámbricas tienen aplicaciones móviles; además, la frecuencia de operación para estos servicios se encuentra en su mayoría por debajo de los 2GHz. Por lo que los modelos de propagación existentes son válidos solo para ese intervalo de frecuencias.

Ante la necesidad de contar con un modelo, que pueda predecir las pérdidas por trayectoria, el grupo de trabajo de acceso de banda ancha inalámbrica IEEE 802.16 ha retomado algunos modelos que han sido modificados, agregando factores de corrección para extender su aplicabilidad a frecuencias mayores a las que fueron validados, tales modelos son de acuerdo con Erceg *et al.* (2001):

- Modelo Hata
- Modelo Hata COST-231
- Modelo Walfish-Ikegami
- Modelo Erceg

Los tres primeros modelos son para escenarios urbanos, aunque el COST-231 también puede ser utilizado para áreas semiurbanas o abiertas mientras que el modelo Erceg es el único que considera escenarios rurales.

Como el modelo Erceg es una extensión de escenarios con frecuencias de operación menores a los 3.5GHz, la validez que se ha realizado en algunos estudios, no ha quedado plenamente establecida.

## Capítulo IV

---

### Simulación y análisis del modelo de propagación propuesto

---

#### IV.1 Introducción

En este capítulo se presenta el procedimiento realizado para determinar el modelo de propagación para cada uno de los escenarios propuestos de acuerdo con el perfil del terreno de los enlaces. También se analiza la validez del modelo propuesto a través de los modelos deducidos en las investigaciones realizadas por Imperatore *et al.*, (2007) y Abhayawardhana *et al.*, (2005). De igual manera se realiza una comparación con los modelos propuestos por el estándar IEEE 802.16, principalmente con el modelo Erceg.

#### IV.2 Diseño de red WiMAX

Colima es un estado de la república Mexicana que está conformado por los municipios de: Armería, Colima, Comala, Coquimatlán, Cuauhtémoc, Ixtlahuacán, Manzanillo, Minatitlán, Tecomán y Villa de Álvarez. Su superficie de 5625Km<sup>2</sup> se caracteriza por una sinuosidad continua a excepción de las zonas costeras y el valle de Colima, donde el relieve es ascendente a la zona de los volcanes.

La red de la Universidad de Colima está conformada por los enlaces mostrados en la figura 6, sin embargo, debido a las condiciones geográficas del estado, diversos campus pertenecientes a la universidad se encuentran fuera de la red universitaria. Para poder brindar el servicio de Internet a esos lugares se hace uso de otras tecnologías como: satelital y DSL, en la tabla V se listan dichos campus.



Figura 6. Red de la Universidad de Colima

Todos los enlaces de la red figura 6 son inalámbricos a excepción de la conexión Coquimatlán-Colima que es a través de fibra óptica.

Tabla V. Sitios fuera de la red Universitaria

Satélite	DSL
Ixtlahuacán	Camotlán de Miraflores
Tepames	Minatitlán
Suchitlán	Colomo
	Madrid
	Chandiablo
	Quesería
	Cuauhtémoc
	Comala

En la figura 7 se muestra la distribución de los sitios a cubrir, los puntos representados por un círculo indican el lugar a donde se quiere llevar el servicio de banda ancha, los sitios representados por un triángulo son las estaciones base existentes, a excepción de Coquimatlán y Manzanillo que son agregadas para esta propuesta.

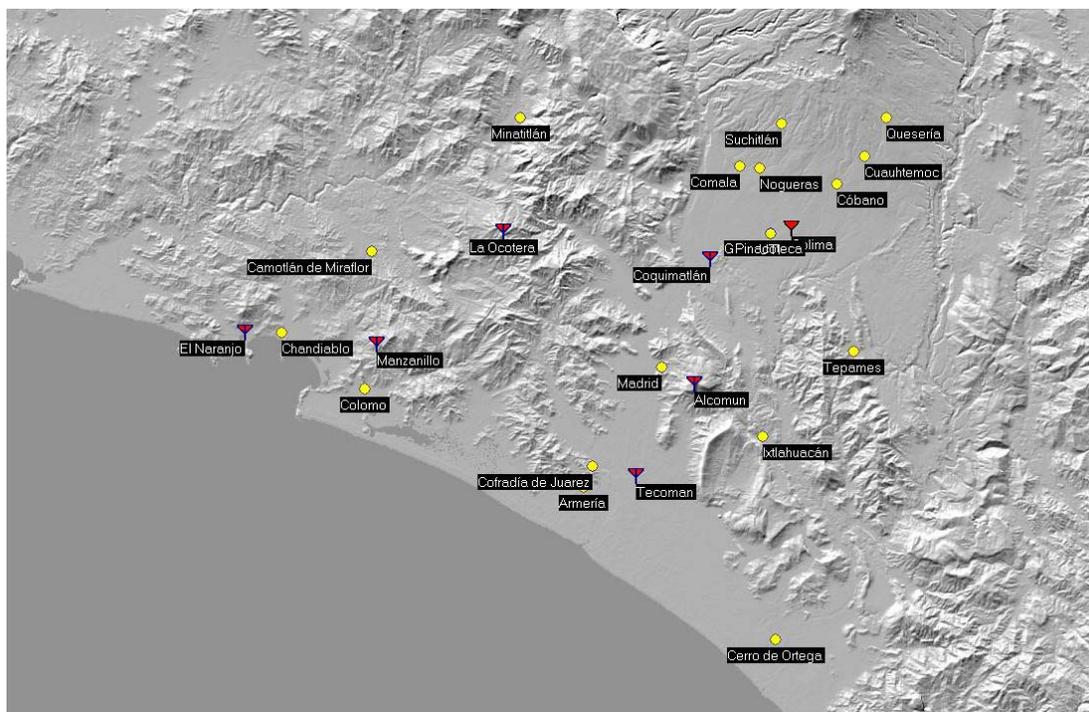


Figura 7. Sitios a integrar a la red Universitaria

Las coordenadas de los sitios fueron obtenidas vía GPS en la primera visita realizada a los lugares considerados. Sin embargo, en algunos casos fue necesario modificar la ubicación de los sitios debido a que los enlaces no eran viables, por lo que se reubicó la posición de las antenas. La actualización de las coordenadas se obtuvo con la ayuda del software Google Earth, además esta herramienta se utilizó para tener un mayor conocimiento del tipo de terreno y de los obstáculos que pudieran interferir dentro de la trayectoria de la señal transmitida.

Como la propuesta del gobierno federal busca hacer uso de la infraestructura disponible, así como el compartimiento de la misma con otras instancias federales o de otro orden de gobierno, la red propuesta está basada en la dorsal mostrada anteriormente en la figura 6, la cual en su mayoría está conformado por sitios de la Universidad de Colima a excepción del sitio ubicado en el cerro del Alcomún, que pertenece al Gobierno del Estado. La imagen de la figura 8 muestra la red WiMAX propuesta, a esta red se agregan las

estaciones base, Manzanillo y Coquimatlán, para cubrir los sitios El Colomo, Comala y Nogueras.

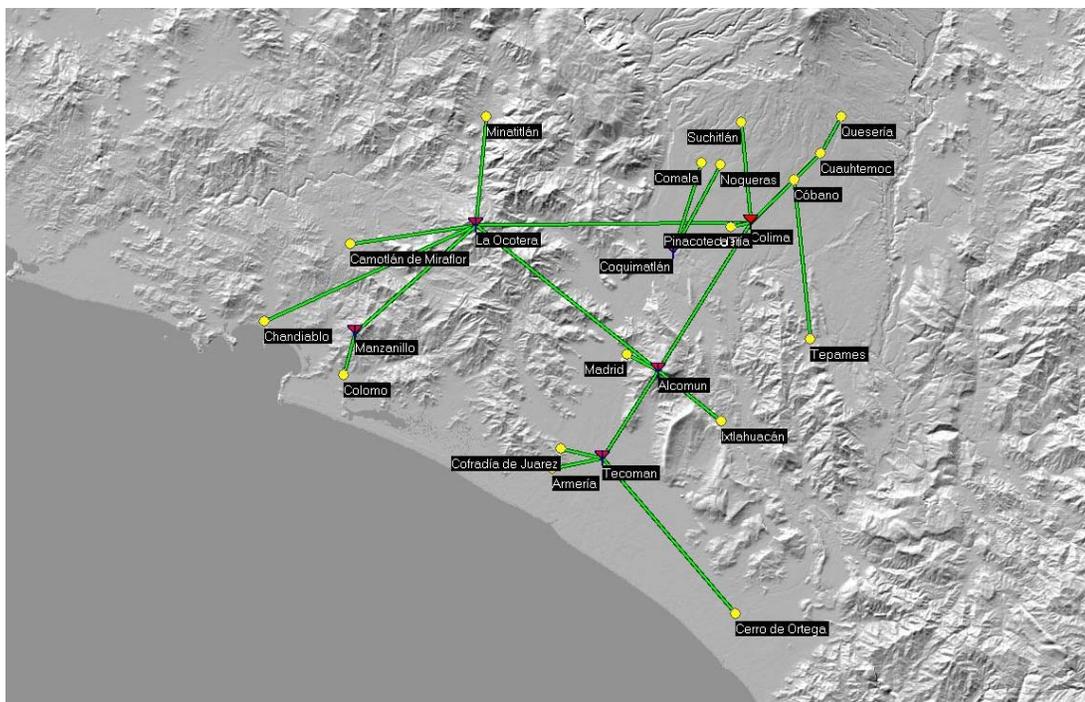


Figura 8. Red WiMAX para la Universidad de Colima

Para el diseño de la red WiMAX se consideraron tres fabricantes, en la tabla VI se muestran las especificaciones técnicas de los equipos.

Tabla VI. Especificaciones Técnicas

	<b>Alvarion</b>	<b>Nortel</b>	<b>Red Line</b>
<b>Potencia de Transmisión</b>	28/20 dBm	27/24 dBm	23/20 dBm
<b>Ganancia de Antena</b>	17 dBi	17 dBi	14 dBi
<b>Sensibilidad</b>	-82/85, -100/103 dBm	-115/103 dBm	-98 dBm
<b>Altura de las antenas</b>	25m	25m	25m

Con el análisis de las especificaciones técnicas se busca determinar la viabilidad de los enlaces con los equipos listados en la tabla VI. Como las pérdidas por trayectoria no dependen del equipo utilizado, sino de las condiciones del medio de propagación, los valores con respecto a las ganancias de las antenas y la potencia de transmisión de los

equipos, se puede manipular con respecto al nivel de sensibilidad que se desee. Por ejemplo, si se proponen antenas con mayor ganancia se puede disminuir la altura de las torres que contienen a las antenas o viceversa, si se aumenta la altura de las torres de las antenas se pueden utilizar antenas con menor ganancia. En este caso el equipo que ofrece mejores características es el de Nortel, ya que maneja una mayor sensibilidad de la señal recibida.

Para lograr la inclusión de todos los sitios de la red de la figura 8, se sugiere que se considere añadir los sitios Manzanillo y Coquimatlán ya que a través de ellos se llega a los campus del Colomo, Comala y Nogueras. De igual forma es importante que el equipo de radio a utilizar tenga especificaciones similares a las de los equipos presentados en la tabla VI, siendo el equipo de Nortel el que ofrece mejores características en cuanto a la sensibilidad de la señal y potencia de transmisión.

### IV.3 Clasificación de escenarios

De acuerdo con las condiciones orográficas del estado de Colima, y conforme a la ubicación de los sitios que se tiene previsto implementar, se proponen dos escenarios de trabajo para el modelo propuesto. El primer escenario abarca los enlaces que se encuentran en terrenos montañosos, y el segundo grupo lo forman los enlaces que se encuentran en áreas con terrenos llanos; la clasificación de los enlaces conforme al tipo de terreno se muestra en la tabla VII.

Tabla VII. Clasificación de Enlaces.

<i><b>Enlaces en Terrenos Llanos</b></i>	<i><b>Enlaces en zonas Montañosas</b></i>
Colima-Galería	Alcomún-Madrid
Colima-Pinacoteca	Manzanillo-Colomo
Colima-UTI	Alcomún-Ixtlahuacán
Cuauhtémoc-Quesería	Tecomán-Alcomún
Tecomán-Cofradía de Juárez	Ocotera-Minatitlán
Tecomán-Armería	Ocotera-Camotlán de Miraflores
Colima-Cóbano	Ocotera-Manzanillo
Coquimatlán-Comala	Colima-Alcomún
Colima-Cuauhtémoc	Ocotera-Chandiablo

Coquimatlán-Nogueras	Ocotera-Alcomún
Colima-Suchitlán	Colima-Ocotera
Cóbano-Tepames	
Tecomán-Cerro de Ortega	

En las imágenes de las figuras 9 y 10, se muestra la distribución de los sitios conforme a la clasificación del perfil de terreno realizada en la tabla VII. La figura 9, contiene los enlaces en zonas llanas, mientras que en la figura 10, se muestran los enlaces a través de terrenos montañosos.

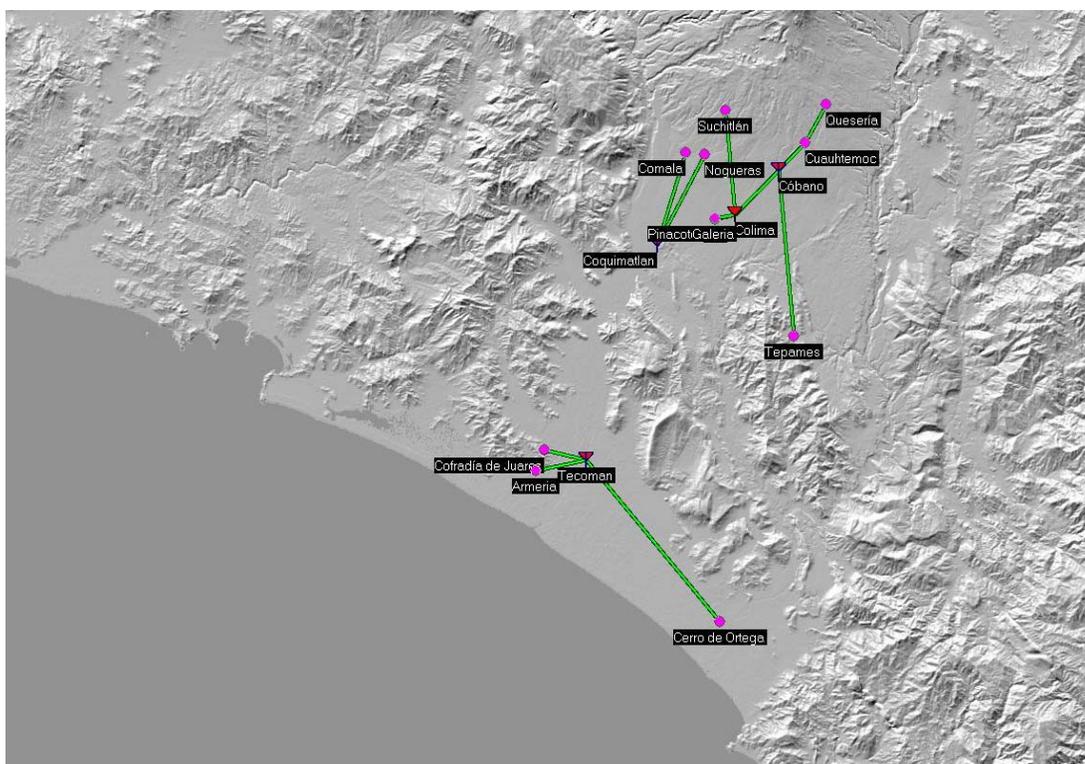


Figura 9. Enlaces en terrenos llanos

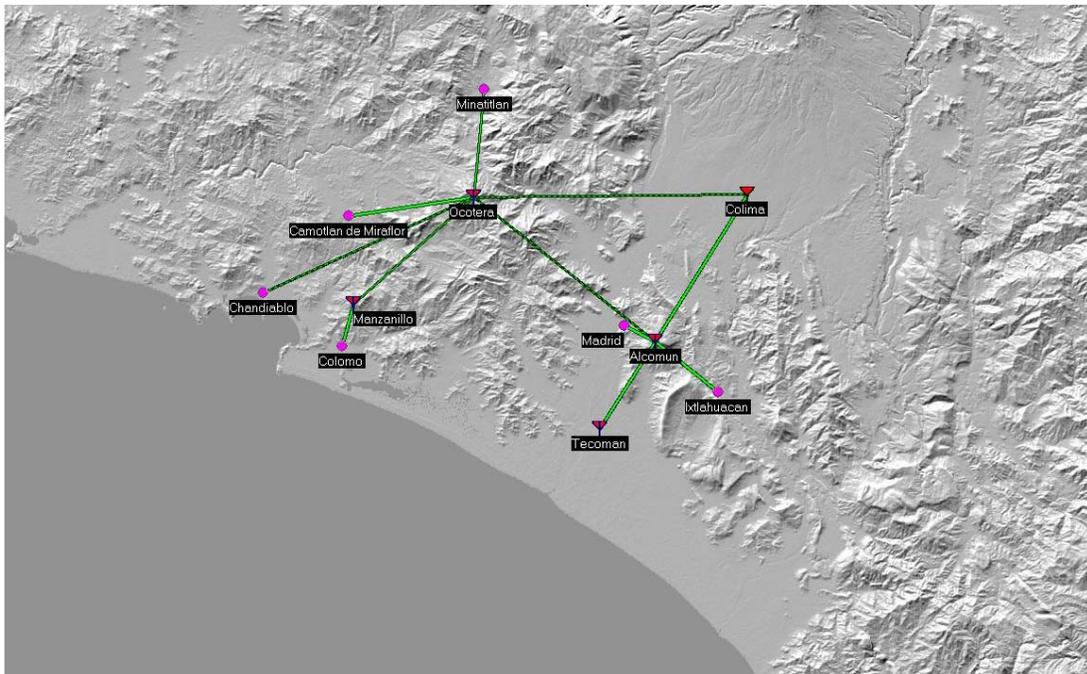


Figura 10. Enlaces en terrenos montañosos

Una vez definidos los sitios que se integrarán a la red de la universidad, es necesario realizar la consideración de algunos parámetros requeridos para el cálculo de los enlaces, de acuerdo a la herramienta de simulación que se está proponiendo, estos parámetros se analizan en la siguiente sección.

#### IV.4 Consideración de parámetros

Para el cálculo de pérdidas por trayectoria se utilizó el software Radio Mobile (Ver Anexo B), los parámetros de entrada que se necesitan ingresar son los siguientes:

- Rugosidad del terreno
- Clima
- Refractividad de la superficie
- Conductividad del suelo
- Permitividad del suelo

- Polarización de la antena

La rugosidad del terreno se determina a través de la información proporcionada por modelos digitales de terreno, los cuales son una representación simplificada de una estructura numérica de datos en archivos que contienen la información sobre la topología del terreno en cuanto a las alturas sobre el nivel del mar. Los modelos que se utilizaron son SRTM, los cuales tienen una resolución de 3 arco segundos es decir de aproximadamente 100m (Pellejero Ibáñez, 2009).

La elección del clima es una tarea minuciosa debido a las características que presenta cada lugar, además de que se pueden encontrar diversos tipos de clasificación, como la del INEGI, la cual considera únicamente los lugares del país. Una clasificación más general es la realizada por Köppen, quien hace una propuesta mundial basada en temperaturas y precipitaciones de cada región, siendo esta, una de las clasificaciones más utilizadas.

El INEGI (2009) considera tres tipos de clima para el estado de Colima:

- cálido subhúmedo,
- seco y semiseco,
- templado subhúmedo

su distribución se muestra en la figura 11, siendo el cálido subhúmedo el más predominante.

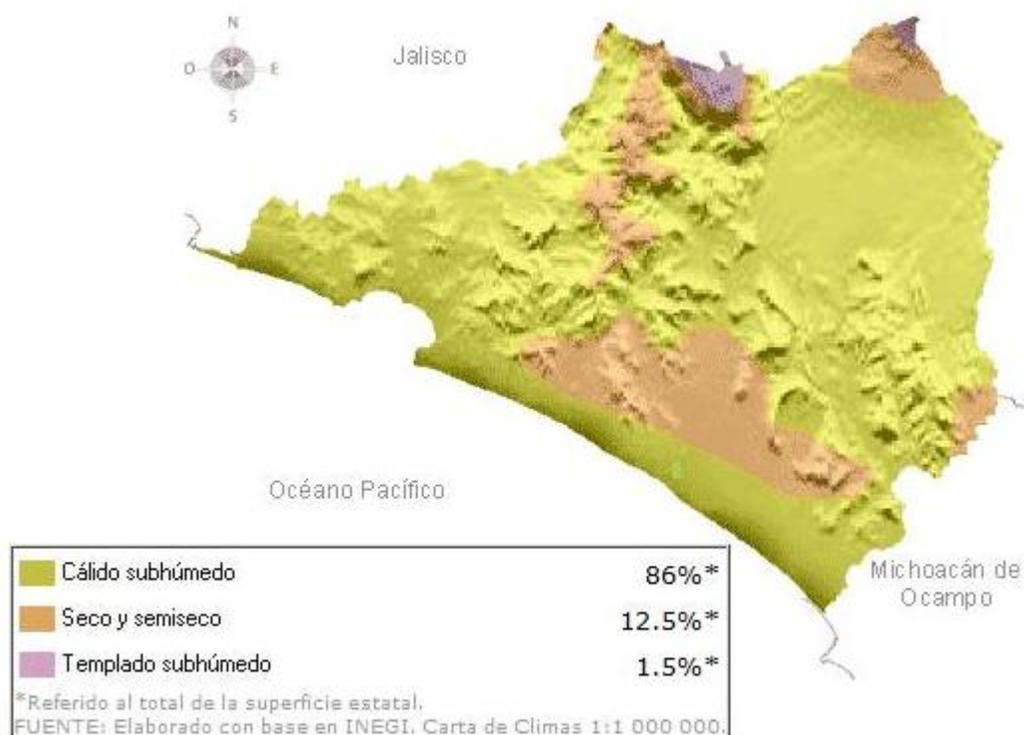


Figura 11. Climas predominantes de Colima

De acuerdo con la clasificación climática mundial realizada por Köppen, el estado de Colima se encuentra dentro de la categoría de climas tropicales lluviosos, específicamente en la subclasificación sabana tropical, la cual tiene la característica de tener un clima tropical con estación seca en invierno, denominada como Aw, como se muestra en la figura 12 (Fernández de Bulnes, 2009).



De acuerdo con la recomendación UIT-R P.617-1 (1992), el clima marítimo subtropical corresponde a las zonas comprendidas entre 10° y 20° de latitud, y suele ser típico de las tierras bajas situadas a proximidad del mar, en base a ello y a la clasificación realizada por Köppen, el clima que se considera para Colima es el marítimo subtropical.

El índice de refracción de la superficie es determinado del mapa de Bean (Hufford et al. 1982), mientras que los valores de la conductividad y permitividad del suelo son obtenidos de la recomendación UIT-R P.527-3 (1992), considerando un tipo de suelo húmedo. Para ambas antenas del enlace el tipo de polarización que se utiliza es vertical debido a que esta presenta menor atenuación bajo condiciones de lluvia. En la tabla VIII, se listan los valores de los parámetros mencionados.

Tabla VIII. Parámetros de entrada del software Radio Mobile.

Rugosidad del terreno	Mapas SRTM
Clima	Marítimo sub-tropical
Refractividad de la superficie	370
Conductividad del suelo	0.5
Permitividad relativa al suelo	25
Polarización de las antenas	Vertical

Una vez que se determinaron todos los parámetros de entrada, se realiza el cálculo de pérdidas por trayectoria utilizando el software Radio Mobile. Con la finalidad de tener un mayor número de datos para deducir el modelo de propagación, se consideraron las pérdidas por trayectoria con muestras cada 200m hasta un kilómetro del sitio.

En la imagen de la figura 13, se muestra la pantalla de resultados que arroja el programa para cada uno de los enlaces de la red. En la parte superior de la ventana aparecen los cálculos realizados por el programa de acuerdo a los parámetros mencionados anteriormente. En la parte inferior de la imagen aparecen las especificaciones técnicas del enlace. Los valores de interés que se consideran para la deducción del modelo de pérdidas por trayectoria son; las pérdidas por trayectoria y la distancia del enlace, enmarcadas con un cuadro en la imagen.

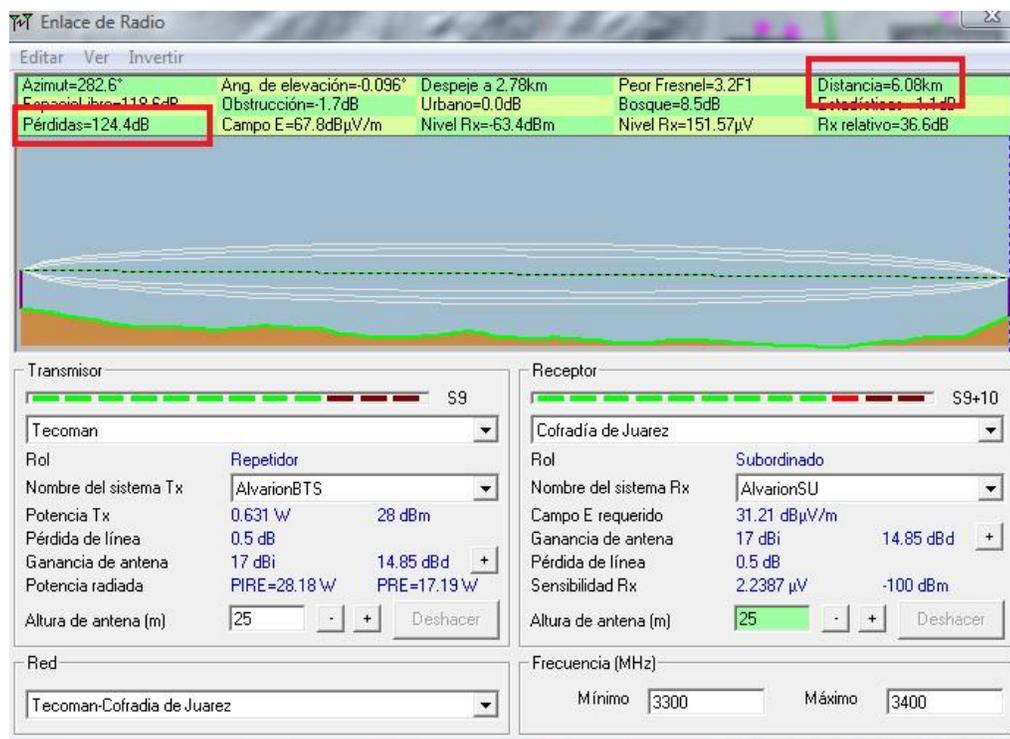


Figura 13. Pantalla de resultados del software

La recolección de las pérdidas por trayectoria de los enlaces permite tener una idea de la tendencia de los resultados de propagación para cada escenario propuesto. Sin embargo es necesario contar con una expresión que establezca el comportamiento de las pérdidas por trayectoria.

Una forma de obtener dicha expresión es a través del uso de la técnica de regresión lineal por mínimos cuadrados. Este procedimiento es utilizado por Abhayawardhana (2005) e Imperatore (2007) para deducir su modelo de propagación. Esta técnica se explica en la siguiente sección, al mismo tiempo que se presenta el procedimiento para determinar los parámetros de interés del modelo propuesto para cada escenario.

## IV.5 Ajuste por mínimos cuadrados

El objetivo de realizar un ajuste de curvas es encontrar una curva suave que acople los datos en el promedio. Esta curva debe tener una forma simple (por ejemplo polinomios de bajo orden). Sea

$$f(x) = f(x; a_1, a_2, \dots, a_m) \quad (17)$$

la función que será ajustada a los  $n$  puntos de datos  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . La notación implica que se tiene una función de  $x$  que contiene los parámetros  $a_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ , donde  $m < n$ . La forma de  $f(x)$  es determinada antes, usualmente de la teoría asociada con el experimento del cual los datos son obtenidos (Kiusalaas, 2005). En este caso, los datos representan las pérdidas por trayectoria  $p_i$  de un enlace a una cierta distancia. Como se trató en la sección III.4.3, se espera que la ecuación que represente dichas pérdidas sea la dada por la expresión 14. El ajuste de la curva consiste de dos pasos: la elección de la forma de  $f(x)$ , seguido por el cálculo de los parámetros que producen el mejor ajuste de los datos.

El método que se utiliza a menudo es el ajuste por mínimos cuadrados, el cual minimiza la función

$$S(a_1, a_2, a_3, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \quad (18)$$

con respecto a cada  $a_j$ . Por lo tanto, los valores óptimos de los parámetros están dados por la solución de las ecuaciones

$$\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

Los términos  $r(i) = y_i - f(x_i)$  de la ecuación 18, son llamados residuales; y representan la discrepancia entre los puntos de datos y la función de ajuste en  $x_i$ . La función  $S$  será minimizada a la suma de cuadrados residuales (Kiusalaas, 2005).

### IV.5.1 Ajuste a una línea recta

El método de mínimos cuadrados consiste en encontrar una función cuya gráfica sea lo más aproximada a los datos obtenidos de algún experimento. Para el caso en que los datos tienden a tomar el comportamiento de una recta, el ajuste consiste en calcular el valor de los términos  $a$  y  $b$  de la ecuación 20. Este método también se puede aplicar a relaciones no lineales (Yang *et al.*, 2005), tal es el caso que se tiene, para ello solo es necesario realizar un cambio de variables el cual se presentará en la ecuación 32.

$$f(x) = a + bx \quad (20)$$

Al ajuste de datos a una línea recta también se le conoce como regresión lineal. Al sustituir la ecuación 20 en 18, la función a minimizar queda expresada de la siguiente forma:

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (21)$$

las ecuaciones deducidas de 19, ahora están dadas por las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^n -2(y_i - a - bx_i) = 2(-\sum_{i=1}^n y_i + na + b \sum_{i=1}^n x_i) = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{i=1}^n -2(y_i - a - bx_i)x_i = 2(-\sum_{i=1}^n x_i y_i + a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2) = 0 \quad (23)$$

si se dividen las ecuaciones 22 y 23 por  $2n$  se tiene

$$-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i + a + \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0 \quad (24)$$

$$-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i x_i + \frac{a}{n} \sum_{i=1}^n x_i + \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \quad (25)$$

Sean  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$        $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$       (26)

Despejando  $a$ , de la ecuación 24 y definiendo  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  como en 26, se tiene el siguiente resultado

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (27)$$

$$-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i + a\bar{x} + \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \quad (28)$$

Para determinar el valor de  $b$ , se sustituye la ecuación 27 en 28 obteniendo;

$$-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i x_i + (\bar{y} - b\bar{x})\bar{x} + \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0 \quad (29)$$

reagrupando los términos de la ecuación anterior se tiene,

$$b \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i x_i - \bar{y}\bar{x} \quad (30)$$

si a la ecuación 30 se multiplica por  $n$  y se despeja  $b$  se tiene

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{y}\bar{x}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad (31)$$

con las ecuaciones 27 y 31 se puede determinar el valor de los parámetros  $a$  y  $b$  de la expresión propuesta en la ecuación 20.

Para determinar el valor inicial de las pérdidas  $P_0$  y el exponente de pérdidas por trayectoria  $\gamma$  de los resultados obtenidos, se realiza el siguiente cambio de variables

$$f(x) = a + bx \implies PL = P_0 + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (32)$$

donde,

$$a = P_0, b = 10\gamma \text{ y } x = \log_{10} d/d_0 \quad (33)$$

Tomando en cuenta el cambio de variables, se realizó un programa en Matlab para calcular los valores correspondientes de los parámetros que definen el modelo propuesto, sustituyendo en las ecuaciones 27 y 31, los valores de pérdidas por trayectoria  $p_i$  para cada distancia  $x_i$ , arrojados en las corridas del programa Radio Mobile.

## IV.6 Metodología del modelo de propagación

El desarrollo presentado hasta ahora en este capítulo se puede ver resumido en el diagrama a bloques de la figura 14.



Figura 14. Metodología del Modelo de Propagación

En los parámetros de entrada se consideran, las especificaciones técnicas del equipo de radio, frecuencia de operación, polarización de las antenas y los factores que determinan las condiciones del ambiente de propagación. Estos parámetros son establecidos en el software Radio Mobile; el cual calcula las pérdidas por trayectoria de cada uno de los enlaces de la red. El cálculo de los parámetros  $P_0$  y  $\gamma$ , se realiza con un programa diseñado en Matlab utilizando la técnica de ajuste por mínimos cuadrados.

Con este procedimiento se obtiene el valor del exponente de pérdidas por trayectoria y las pérdidas iniciales del modelo de propagación propuesto para la banda de operación de 3.3GHz, dado por la ecuación 14.

Como el modelo propuesto está basado en la ecuación de la recta, este presenta un comportamiento lineal, por lo tanto cuanto mayor sea el valor de  $\gamma$ , las pérdidas por trayectoria se incrementaran más rápido conforme aumente la distancia del enlace.

#### IV.7 Resultados de Simulación

En la gráfica de la figura 15, se muestran los resultados del proceso presentado en la figura 14. La regresión de mínimos cuadrados LSR (*least squares regression*) para terrenos montañosos es la línea continua y ésta representa el modelo de propagación para el escenario donde se consideran los enlaces a través de zonas montañosas, siendo este escenario el que presenta mayor degradación de la señal. La línea punteada es la regresión de mínimos cuadrados LSR para terrenos llanos y establece el comportamiento para este tipo de terreno. En la gráfica de la figura 15, se observa la necesidad de contar con la clasificación de dos perfiles de terreno para el modelo de propagación propuesto, que permitan determinar las pérdidas por trayectoria para los enlaces, dependiendo de las condiciones de terreno que se tengan.

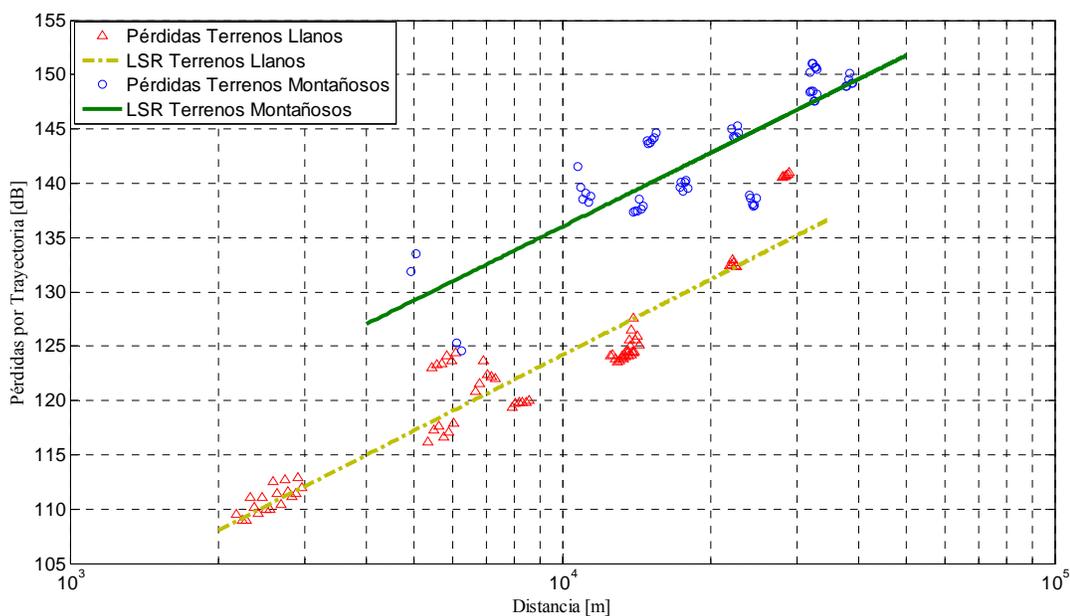


Figura 15. Comportamiento de la clasificación del modelo de propagación propuesto

En la tabla IX, se muestran los valores de los parámetros que definen el comportamiento de la ecuación 14.

Tabla IX. Valor de los parámetros dependiendo el perfil del terreno

Parámetro	Perfil montañoso	Perfil llano
$P_0$	129.05	108.9
$\gamma$	2.25	2.3

Para validar los resultados obtenidos, las gráficas de la figura 15 se compararon con los modelos propuestos por Imperatore *et al* (2007) y Abhayawardhana *et al* (2005), los cuales se obtienen de mediciones realizadas en escenarios rurales con una red WiMAX ya implantada.

En la tabla X, se presenta el valor de los parámetros de los modelos que se utilizan como referencia. Es importante mencionar que el escenario en el cual se obtuvieron estos valores corresponde a un perfil de terreno llano, ubicados en las localidades de Piemonte,

Italia y Cambridge, Reino Unido, teniendo como frecuencia de operación la banda de 3.5GHz.

Tabla X. Valor de los parámetros de los modelos de referencia

Parámetro	Imperatore	Abhayawardhana
$P_0$	103.3	110
$\gamma$	2.5	2.13

Para el caso del escenario con perfil de terreno montañoso no se ha encontrado algún trabajo de investigación donde se reporte el valor de estos parámetros. Sin embargo, el exponente de pérdidas por trayectoria obtenido para escenarios llanos, se encuentra dentro del intervalo de los valores obtenidos en investigaciones realizados anteriormente, considerando que la variación de dicho parámetro, depende de las condiciones del escenario de operación.

#### IV.7.1 Modelo para terrenos montañosos

El comportamiento para los enlaces con perfil de terreno montañoso está representado por la ecuación 34.

$$PL = 129.05 + 10(2.25) \log_{10} \left( \frac{d}{4920} \right) \quad (34)$$

En la gráfica de la figura 16 el comportamiento representado por la línea continua describe las pérdidas por trayectoria para el perfil de enlaces con terrenos montañosos, las líneas punteadas representan los modelos propuestos por Abhayawardhana et al. (2005) e Imperatore et al. (2007).

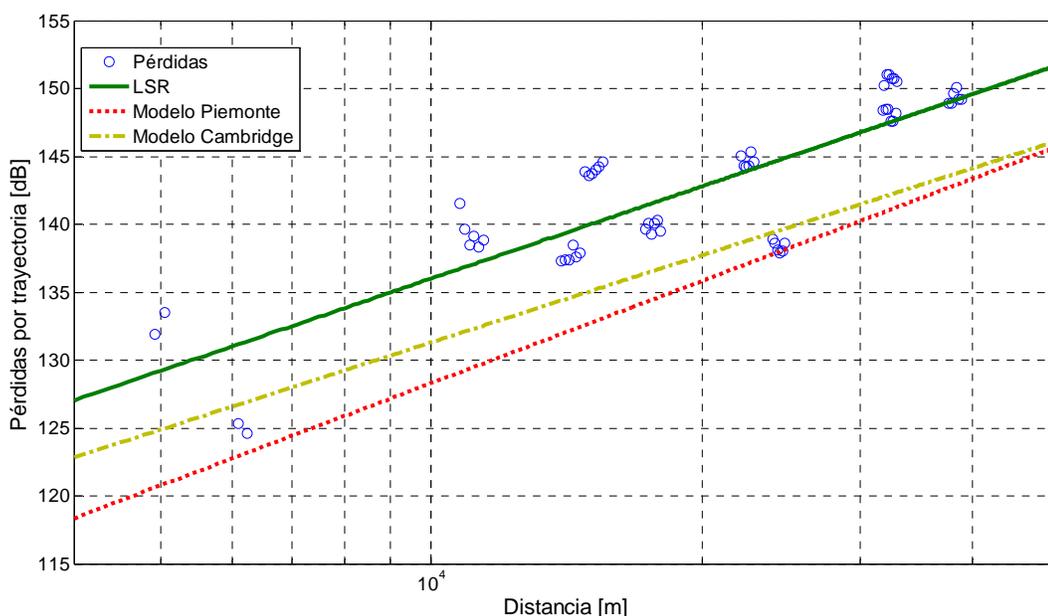


Figura 16. Comparación de los modelos experimentales con la clasificación para terrenos montañosos

El terreno tipo A correspondiente a escenarios montañosos de la clasificación realizada por Erceg, es el que ofrece mayores pérdidas por trayectoria. Considerando que los modelos que se utilizan para validar los resultados obtenidos, fueron deducidos en un ambiente de propagación con un perfil de terreno llano, es de esperarse que las pérdidas que representan la clasificación montañosa del modelo propuesto, estén por encima de los modelos experimentales como lo muestra la figura 16, de acuerdo con lo presentado en la sección III.4.1.

La diferencia de pérdidas por propagación de la clasificación para terrenos montañosos del modelo propuesto y los modelos en Piemonte y Cambridge está entre 10dB y 5dB respectivamente para distancias menores a 10Km para distancias mayores a esta la diferencia tiende a ser de 5dB. En el modelo Erceg, la diferencia de pérdidas por trayectoria entre este tipo de escenarios es de 20dB aproximadamente para distancias alrededor de los 10Km, conforme aumenta la distancia esta diferencia también incrementa. La razón por la cual no se muestra este mismo comportamiento en la gráfica, es porque los modelos experimentales de Piemonte y Cambridge, son obtenidos bajo diferentes ambientes de propagación y en la banda de 3.5GHz, además de que la propuesta de Erceg, es un modelo

que sobreestima las pérdidas por trayectoria de acuerdo con Abhayawardhana et al. (2005) e Imperatore et al. (2007).

#### IV.7.2 Modelo para terrenos llanos

En la figura 17, se muestra la comparación de los modelos experimentales con la segunda clasificación de enlaces propuesta, los ubicados en terrenos llanos.

En este caso se observa que el comportamiento del modelo propuesto para la clasificación de terrenos llanos, es más parecido a los modelos experimentales utilizados para su validación, si bien las pérdidas por trayectoria tienen una tendencia menor a los otros dos modelos, esto se debe en parte a que la frecuencia de operación utilizada en las referencias está en la banda de frecuencia de 3.5GHz y en esta propuesta se están calculando las pérdidas por trayectoria para la banda de frecuencia de 3.3GHz, recordemos que a mayor frecuencia de operación mayores son las pérdidas por trayectoria, agregando además que las condiciones de propagación son distintas, sin embargo se puede observar que para el caso del modelo de Piemonte para distancias menores a 10Km, existe una diferencia de pérdidas de aproximadamente 3dB y para distancias mayores a esta la diferencia tiende a 5dB.

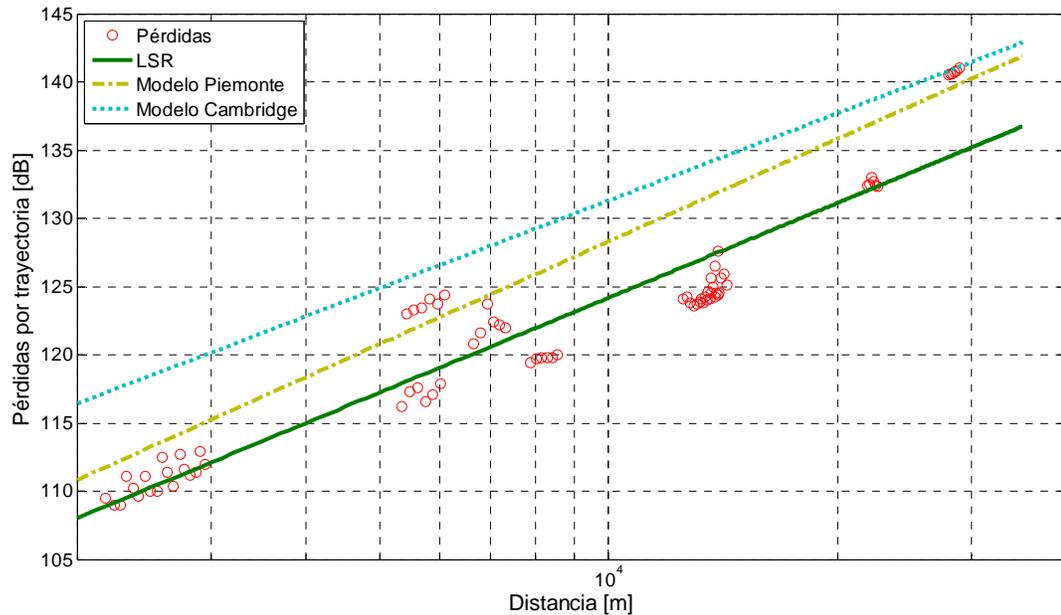


Figura 17. Comparación de modelos experimentales con la clasificación para terrenos llanos

La ecuación que representa el comportamiento de la pendiente del modelo propuesto para terrenos llanos está dado por:

$$PL = 108.9 + 10(2.3) \log_{10} \left( \frac{d}{2180} \right) \quad (35)$$

Como se puede ver en las graficas de las figuras 16 y 17, los modelos de propagación no están alejados de lo presentado en las mediciones realizadas en las localidades de Italia y Reino Unido, tomando en cuenta que las variaciones dependen de las condiciones de los escenarios de trabajo.

#### IV.7.3 Comparación con modelos sugeridos por el grupo de trabajo IEEE 802.16

En las investigaciones realizadas por Abhayawardhana et al. (2005) e Imperatore et al. (2007), se muestra que los modelos propuestos para escenarios rurales por el grupo de trabajo de la IEEE 802.16 no son viables para frecuencia de 3.5GHz. En esta sección se

analiza nuevamente el comportamiento de los modelos Erceg y COST-231 pero para la frecuencia de 3.3GHz.

En la figura 18, se observa la comparación del modelo propuesto para terrenos llanos con los recomendados por el grupo de trabajo IEEE 802.16. En esta figura se observa como el modelo Erceg sobreestima las pérdidas por trayectoria esperadas por más de 30dB para distancias menores a los 3000m, conforme aumenta la distancia del enlace se sobrevalua aun más el valor de las pérdidas. En el caso del modelo COST-231 las pérdidas por trayectoria son subestimadas cerca de 30dB alrededor de los 3000m, contrario del modelo Erceg conforme aumenta la distancia la diferencia del valor subestimado con el valor esperado disminuye.

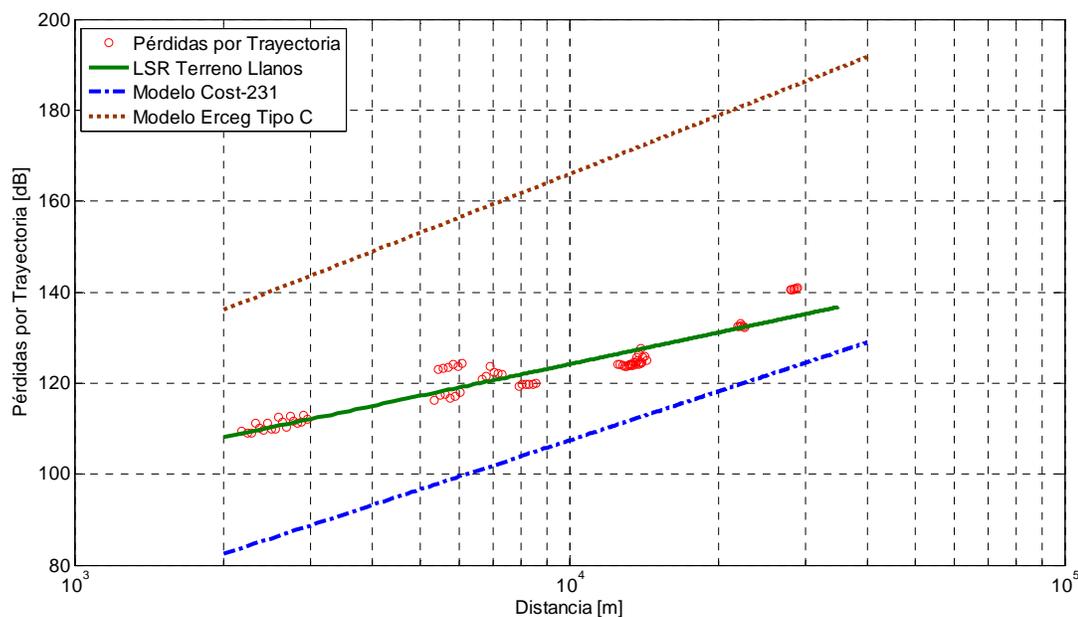


Figura 18. Comparación del modelo propuesto para terrenos llanos con los sugeridos por el grupo de trabajo IEEE 802.16

La clasificación utilizada del modelo Erceg para la comparación presentada en la figura 18 es el terreno tipo C, que es característico de terrenos llanos con una baja densidad de árboles, para el caso del modelo COST-231 se tomaron en cuenta las consideraciones mencionadas en la sección III.4.2 para escenarios suburbanos o ambientes abiertos.

Para la clasificación de terrenos montañosos se tiene un resultado similar al anterior, pero en este caso el modelo propuesto solo se comparó con el modelo Erceg considerando el terreno tipo A, el cual es característico de terrenos montañosos con una alta densidad de árboles. No se realizó una comparación con el modelo COST-231 debido a que este modelo solo considera dos tipos de escenarios, urbanos y semiurbanos.

En la figura 19, se observa que el modelo Erceg sobrestima el valor de las pérdidas por trayectoria alrededor de 30dB para los primeros enlaces, conforme aumenta la distancia del enlace esta diferencia se incrementa. La razón por la cual las pérdidas por trayectoria aumentan más rápido en el modelo Erceg es porque el valor de  $\gamma$  es de 4.91 y para el modelo propuesto es de 2.25, la pendiente del modelo Erceg es casi el doble que la del modelo propuesto por lo que las pérdidas por trayectoria aumentan más rápido conforme la distancia del enlace es mayor.

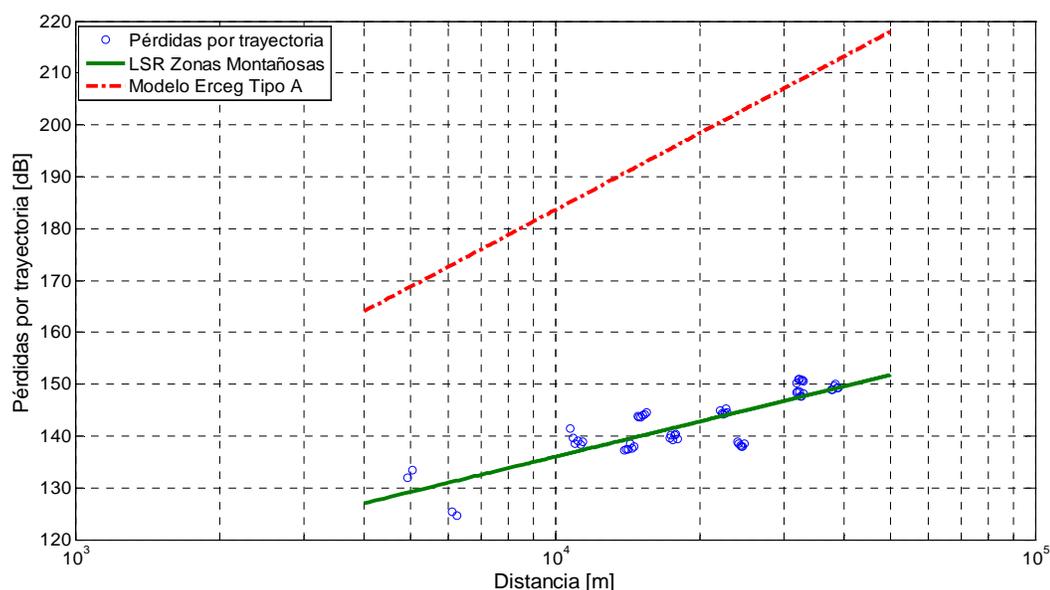


Figura 19. Comparación del modelo propuesto para terrenos montañosos con los sugeridos por grupo de trabajo IEEE 802.16

Las gráficas de las figuras 18 y 19 muestran que la extensión de los modelos propuestos por el grupo de trabajo de la IEEE.80216, tampoco son una opción viable para la banda de 3.3GHz

## IV.8 Viabilidad del modelo

Como se menciona en la sección III.4.3, el modelo de Ley de Potencia agrupa varios efectos en dos parámetros; las pérdidas iniciales  $P_0$  y el exponente de pérdidas por trayectoria  $\gamma$ . Para tener una percepción de la influencia que tiene el clima, sobre estos factores, se realizó el cálculo de estas variables considerando los climas:

- Continental subtropical
- Marítimo templado sobre la tierra

que son característicos de las localidades de Piemonte y Cambridge respectivamente. El valor de los parámetros que describen el comportamiento del modelo para terrenos llanos se muestra en la tabla XI, en la cual se puede ver que el clima no presenta demasiada influencia sobre los parámetros que describen el modelo propuesto.

Tabla XI. Parámetros del modelo con respecto al clima, para terrenos llanos

<b>Parámetro</b>	<b>Marítimo subtropical</b>	<b>Continental subtropical</b>	<b>Marítimo templado sobre la tierra</b>
$P_0$	108.9006	108.7825	108.8463
$\gamma$	2.30	2.34	2.31

En la figura 20, se observa como para distancias menores a 10Km el comportamiento del modelo es el mismo para los dos tipos de climas, mientras que para trayectos mayores existe una ligera diferencia, siendo el clima continental subtropical el que ofrece mayores pérdidas por trayectoria.

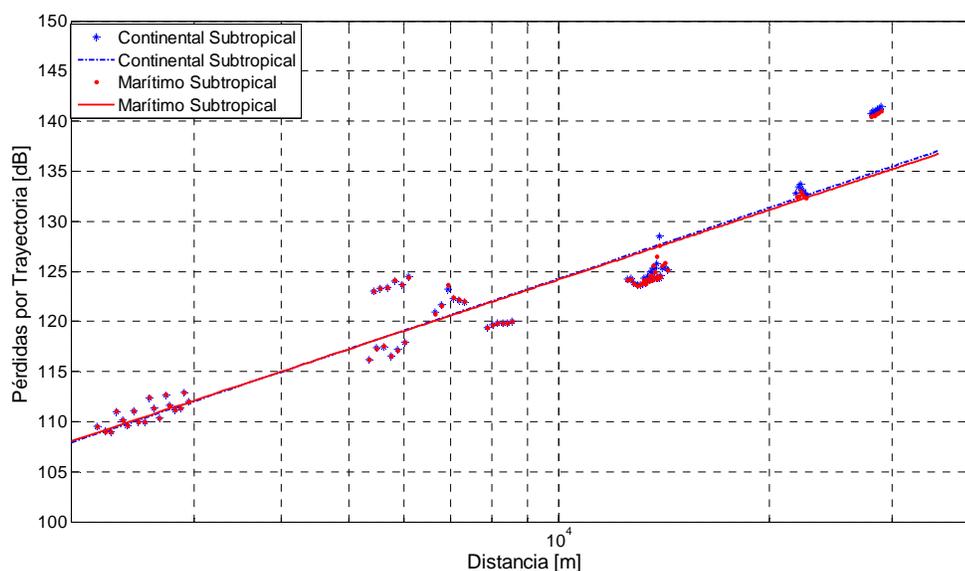


Figura 20. Comparación de climas para terrenos llanos

En la tabla XII, se muestra la variación de los parámetros para terrenos montañosos, de acuerdo al tipo de clima que se pueda tener, al igual que el caso anterior las variaciones que se tienen son mínimas.

Tabla XII. Parámetros del modelo con respecto al clima, para terrenos montañosos

Parámetro	Marítimo subtropical	Continental subtropical	Marítimo templado sobre la tierra
$P_0$	129.0592	129.1186	129.5166
$\gamma$	2.25	2.23	2.22

En la figura 21, se muestra la comparación de los modelos marítimo subtropical y marítimo sobre la tierra. Igual que en el caso anterior, para distancias menores a 10 Km la tendencia de los modelos es similar, y para trayectorias mayores el clima marítimo sobre la tierra ofrece menores pérdidas que el clima característico de Colima marítimo subtropical.

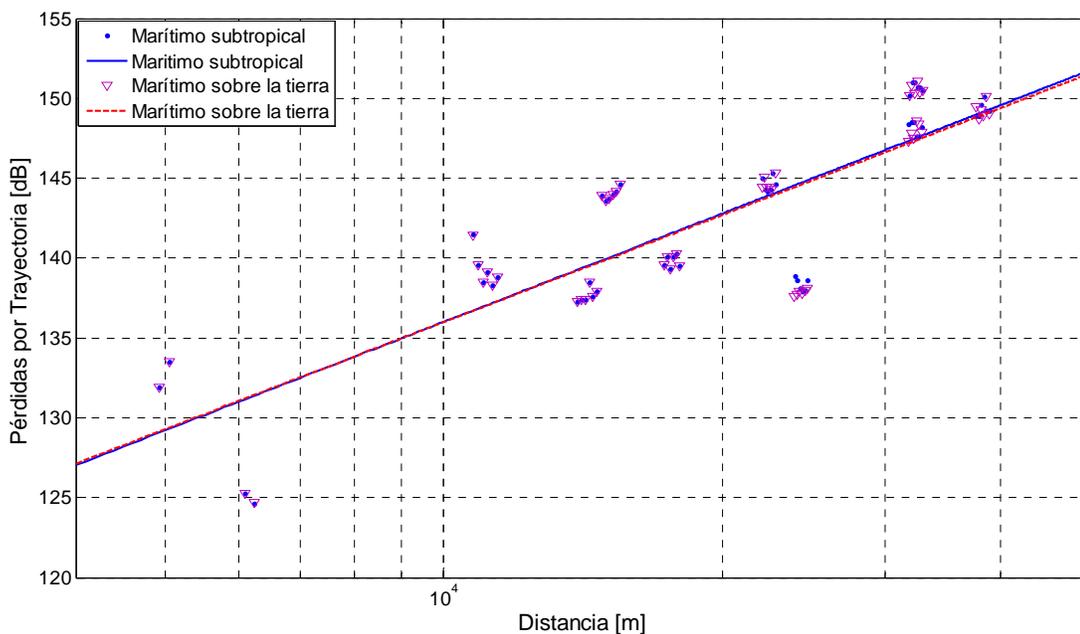


Figura 21. Comparación de climas para terrenos montañosos

En las gráficas de las figuras 20 y 21, se observa como las pérdidas por trayectoria tienen el mismo comportamiento para distancias menores a 10Km sin importar el tipo de clima que se considere. Cuando la distancia es mayor a dicha distancia, las pérdidas por trayectoria aumentan o disminuyen según sea el clima que se considere, sin embargo estas variaciones son mínimas, por lo que se puede asumir que el clima por sí solo no es un factor que influya en el comportamiento de las señales electromagnéticas en la banda de 3.3GHz.

## Capítulo V

---

### Conclusiones

---

#### V.1 Conclusiones

Ante la necesidad de contar con servicios de última milla en comunidades rurales en México, WiMAX es una buena alternativa para llevar este tipo de servicios debido a que tiene la capacidad de llegar a localidades de difícil acceso para otro tipo de tecnologías como: fibra óptica o cable, ya que cuenta con características como: radios de cobertura de hasta 50Km bajo condiciones de línea de vista, altas tasas de transmisión, esquemas de modulación robustos y manejo de calidad de servicio, lo que le permite soportar aplicaciones como servicios de voz y multimedia.

Para la banda de 3.3GHz a 3.5GHz, no existe un modelo de propagación para aplicaciones inalámbricas fijas establecido. Con la llegada de la tecnología WiMAX, el grupo de trabajo de la IEEE 802.16 ha propuesto la extensión de los modelos Erceg y COST-231 para la predicción de las pérdidas por trayectoria en escenarios rurales. Sin embargo en los estudios realizados en las localidades de Italia y Reino Unido ha quedado demostrado que estos modelos no son válidos para la frecuencia de 3.5GHz.

De acuerdo con la figura 5 mostrada en la sección III.4.2, el comportamiento de las señales electromagnéticas en escenarios de propagación urbano y rural es bastante diferente. Ya que para el modelo COST-231, las pérdidas por trayectoria en zonas rurales son mayores que en zonas urbanas, por lo tanto, es importante contar con un modelo de propagación adecuado que permita proyectar el comportamiento de las señales electromagnéticas para cada uno de los escenarios.

El valor del exponente de pérdidas por trayectoria depende principalmente del perfil del terreno y de la altura de la antena de la estación base. En el modelo Erceg,  $\gamma$  está descrito en función de estos parámetros, en el caso del COST-231,  $\gamma$  está expresado solo en función de la altura de la antena de la estación base. Por lo tanto para tener un modelo de propagación general y preciso es necesario expresar el exponente de pérdidas por trayectoria en función de estos parámetros, sin embargo esto requiere un mayor estudio y análisis de datos.

El modelo de Ley de Potencias es una herramienta importante para la deducción de modelos de propagación debido a la simplicidad para determinar los parámetros que lo definen. Debido a esta sencillez, el modelo de Ley de Potencias ha sido utilizado para describir los primeros modelos de propagación para WiMAX en la banda de 3.5GHz, así como para la derivación del modelo propuesto en este trabajo en la banda de 3.3GHz para escenarios de Colima, México.

En el capítulo III, se mostró que el valor del exponente de pérdidas por trayectoria para el modelo Erceg está comprendido entre los valores 4 y 5, este varía dependiendo del tipo de terreno que se tenga. En el modelo COST-231 su valor es de 3.5 para una altura de la antena de la estación base de 25m. De acuerdo con los resultados obtenidos y con las mediciones realizadas en Piemonte y Cambrige, se prevé que el valor del exponente de pérdidas por trayectoria para escenarios rurales en la banda de frecuencia de 3.3 a 3.5 GHz esté entre los valores de 2.13 a 2.5. Por esta razón los modelos de propagación Erceg y COST-231 no son válidos para la banda de frecuencia de 3.3-3.5GHz.

De acuerdo con el análisis realizado en la sección IV.8 para determinar el efecto del clima en el resultado del modelo propuesto, se encontró que el comportamiento de las señales electromagnéticas varía con respecto a éste en enlaces mayores a 10Km, sin embargo estas variaciones no repercuten considerablemente en el resultado, ya que están alrededor de décimas de dB, por lo tanto, el modelo propuesto es válido para diferentes escenarios en los cuales el único parámetro variable que se considere sea el clima.

## V.2 Aportaciones

Se realiza el diseño de una red WiMAX para la Universidad de Colima en base a las condiciones de terreno del estado.

Se propone un modelo de propagación para escenarios rurales para la frecuencia de 3.3GHz, considerando dos tipos de escenarios: perfiles de terreno llano y perfiles de terreno montañoso.

Se presentó el artículo “Propuesta de un modelo de propagación para escenarios rurales utilizando tecnología WiMAX en la banda de 3.3GHz” en el Congreso de estudiantes de Centroamérica y Panamá, CONESCAPAN XXVIII de la IEEE en la República de El Salvador.

## V.3 Trabajo a Futuro.

Realizar un estudio de los parámetros que influyen en las pérdidas por trayectoria de las señales electromagnéticas en un ambiente de propagación, con la finalidad de agregar factores de corrección al modelo propuesto y así este pueda ser válido en otras frecuencias.

## Referencias

- Abhayawardhana, V. S., Wasell, I. J., Crosby, D., Sellars, M. P., y Brown, M. G., 2005, Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems, IEEE Journal on Vehicular Technology Conference. 1: 73-77.
- e-México SCT, 2008, Agenda de Conectividad. Impulso a la Conectividad Social Red Nacional de Educación e Investigación Redes Estatales de Educación, Salud y Gobierno. México. Documento en línea Disponible en: <http://www.redesestatales.gob.mx/publicaciones>. Consultado en: 24 de septiembre de 2009
- Erceg, V., Greenstein, L. J., Tjandra, S. Y., Parkoff, S. R., Gupta, A., Kulic, B., Julius, A. A., Bianchi, R., 1999, An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 17(7): 1205-1211.
- Erceg, V., Hari, K. V. S., Smith, M. S., Baum, D. S., Sheikh, K. P., Tappenden, C., Costa, J. M., Bushue, C., Sarajedini, A., Schwartz, R., Branlund, D., Kaitz, T., Trinkwon, D., 2001, Channel Models for Fixed Applications, Technical report, IEEE 802.16 Broadband Wireless Working Group.
- Fernández de Bulnes M. D., 2009, Geografo.info, Información en línea. Disponible en: <http://www.geografo.info>, geografia> Climatología> Los mapas climáticos> La clasificación de Köppen. Consultada en 22 de septiembre de 2009
- Hernández Pulido A., 2008, Las redes estatales para la educación, salud y Gobierno, Documento en línea. Disponible en: <http://www.udlap.mx/internet2/video/eventos/reunionprimavera08/>. Consultado en 25 de septiembre de 2009.
- Hufford, G. A., Longley, A. G., Kissick, W. A., 1982, A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode, U.S. Department of Commerce, Malcolm Baldrige, Secretary. 67pp.
- Imperatore, P., Salvadori, E., y Chlamtac, I., 2007, Path Loss Measurements at 3.5GHz: A Trial Test WiMAX Based in Rural Environment, TridentCom, 2007. páginas 1-8.
- INEGI, 2009, Cuéntame... de México. Información en línea. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/default.aspx>. Información por Entidad> Colima> Territorio> Clima. Consultada en 22 de septiembre de 2009.

- Jeffrey, G. A., Arunabha, G., y Rias M., 2007, Fundamentals of WiMAX, Understanding Broadband Wireless Networking, Prentice Hall, Primera edición. New Jersey. 449pp.
- Kiusalaas, J. 2005, Numerical Methods in Engineering with MATLAB, Cambridge, Primera edición. New York. 426pp.
- Nuaymi, L., 2007, WiMAX Technology for Broadband Wireless Access, John Wiley & Sons, Ltd. Primera edición. Chichester. 275pp.
- OCDE, 2009, OECD Broadband Portal. Información en línea. Disponible en: <http://www.oecd.org/sti/ict/broadband>. Consultada en septiembre de 2009.
- Pellejero Ibáñez, I., 2009, Manual de cálculo de coberturas con Radio Mobile. Información en línea. Disponible en: <http://www.ipellejero.es/radiomobile/index.html>. Consultada en 22 de septiembre de 2009.
- Radha, K. R. G. S. V., Radhamani, G., 2008, WiMAX A Wireless Technology Revolution, Auerbach Publications Taylor & Francis Group, Primera edición. New York. 368pp.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2002), Sistema Nacional e-México Resumen Ejecutivo. Documento en Línea, Disponible en: [http://www.encuentro.org.mx/recursos/emexico/Resumen Ejecutivo Sis~0013.pdf](http://www.encuentro.org.mx/recursos/emexico/Resumen_Ejecutivo_Sis~0013.pdf). Consultado en 24 de septiembre de 2005
- Schwengler, T., 2008, Propagation and Performance. En: S. Ahson, M. Ilyas (eds). WiMAX Standards and Security. CRC Press Taylor & Francis Group, Miami, 77-102p.
- UIT-R P.527-3, 1992, Características eléctricas de la superficie de la tierra, Recomendación, Unión Internacional de Telecomunicaciones.
- UIT-R P.616-1, 1992, Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de radio enlaces transhorizonte, Recomendación, Unión Internacional de Telecomunicaciones.
- UIT-R P.833-5, 2005, Atenuación debido a la vegetación, Recomendación, Unión Internacional de Telecomunicaciones.
- Wang, F., Ghosh, A., Sankaran, C., Fleming, P. J. Hsieh, F. Benes, S. J., 2008, Mobile WiMAX Systems: Performance and Evolution, Communications Magazine, IEEE. 46(10): 41-19p.

Yang, Y. Y., Cao, W., Chung, Tae-Sang y Morris, J., 2005, Applied Numerical Methods Using MATLAB, John Wiley & Sons, Inc., Primera edición. New Jersey. 509pp.

## ANEXOS

### Anexo A. Criterio de banda ancha.

El criterio que utiliza la OECD para suscriptores de banda ancha de acuerdo a las tecnologías existentes es el siguiente:

1. DSL:
  - a. Se incluyen las líneas DSL que ofrecen conexión a Internet con velocidades de descarga de al menos 256kbps.
  - b. Se excluyen las líneas DSL que no sean usadas para conexión a Internet, por ejemplo líneas dedicadas.
2. De cable:
  - a. Se incluyen los suscriptores con modem de cable con velocidades de descarga mayores a 256Kbps
3. Fibra óptica:
  - a. Incluye a los suscriptores con conexiones de fibra hasta las instalaciones (FTTP) con velocidades de descarga mayores a 256kbps.
  - b. Incluye a los suscriptores con conexiones de fibra hasta el edificio (FTTB), el usuario final es a través de Ethernet
4. Otro:
  - a. Tecnologías inalámbricas solo con velocidades mayores a 256kbps para el usuario final.
    - i. Tecnologías inalámbricas fijas.
      1. Satélite
      2. LMDS
      3. MMDS
      4. WiMAX
      5. Alguna otra tecnología inalámbrica fija.
    - ii. No incluye
      1. Tecnología móvil 3G

2. Wi-Fi
  3. Excepciones: en casos raros se incluye Wi-Fi/3G si es el mecanismo de transporte de un proveedor de servicios rurales fijos, regularmente en zonas rurales.
- b. Cable.
- i. BPL: incluye a los subscriptores con conexión sobre la línea de potencia con velocidades mayores a 256kbps
  - ii. Líneas dedicadas: solo incluye circuitos con conectividad a Internet con velocidades mayores a 256kbps.

## Anexo B. Radio Mobile

El software Radio Mobile puede ser descargado de la siguiente página web: <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>. Este programa fue creado por el ingeniero y radioaficionado canadiense Roger Coude.

Esta herramienta utiliza datos digitales de elevación de terreno para generar un perfil de trayecto entre un emisor y un receptor. Estos datos junto a otros relativos al entorno y a las características técnicas del equipo de comunicaciones, sirven para alimentar el modelo de propagación conocido como *Irregular Terrain Model*, basado en el algoritmo Longley-Rice. Este modelo permite determinar áreas de cobertura de un sistema de radiocomunicaciones que trabaje en una frecuencia comprendida entre los de 20MHz y los 20GHz (Pellejero Ibáñez, 2009).

El tipo de modelos de digitales de terreno que utiliza el software para la realización de los cálculos de cobertura son: GTOPO30/SRTM30 y SRTM-DTED. Ambos modelos han sido elaborados por la Agencia Espacial Norteamericana (NASA) y el Departamento de Geología de los Estados Unidos (USGS), tanto su distribución como su utilización son completamente libres. El modelo GTOPO30/SRTM30 tiene una resolución de 30 segundos de arco (aproximadamente 1Km), mientras que el modelo SRTM-DTED tiene una precisión de 3 segundos de arco (aproximadamente 100m).

Las aplicaciones que se pueden realizar con este software son:

- Predicción del rendimiento de sistemas de radio
- Análisis de la cobertura de un sistema sin necesidad de realizar mediciones sobre el terreno.
- Evaluación de emplazamientos óptimos para la instalación de repetidores sobre el terreno.
- Visualización 2D y 3D de modelos digitales de terreno.
- Extracción del perfil topográfico del vano de un radioenlace.

## Glosario

3G	Acrónimo utilizado para hacer referencia a la tercera generación de telefonía móvil, que está basada en estándares digitales, con la finalidad de ofrecer mayores tasas de transmisión que las generaciones anteriores, además de ofrecer servicios de banda ancha móvil para servicios multimedia e Internet.
ARQ	<i>Automatic Retransmission Request</i> . Protocolo utilizado para el control de errores en la transmisión de datos. Basado en el reenvío de los paquetes de información que se detecten como erróneos.
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i> . Esta técnica permite cambiar el tipo de modulación y codificación, dependiendo de las condiciones del canal inalámbrico.
Beamforming	Técnica usada para ajustar la intensidad de la señal transmitida o recibida en base a la dirección de los sensores (antenas), el ajuste puede ser físico o en el sentido matemático.
BPL	<i>Broadband over Power Line</i> , Tecnología que permite transmitir señales de telecomunicaciones en el protocolo de IP sobre las líneas eléctricas convencionales de casas y edificios, también son conocidas como PLC ( <i>Power Line Communications</i> ).
COFETEL	Comisión Federal de Telecomunicaciones. Dependencia gubernamental encargada de regular promover y supervisar el desarrollo eficiente y la cobertura social amplia de las telecomunicaciones y la radiodifusión en México.
Clutter	Este término es utilizado para referirse al tipo de construcciones características de un terreno en común.
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i> . Equipo de telecomunicaciones usado en interiores como exteriores para originar, encaminar o terminar una comunicación. En WiMAX son las antenas de los subscriptores.
DEM	<i>Digital Elevation Model</i> . Modelo digital del terreno determinado específicamente mediante una red regular de cotas de altitud.

DSL	<i>Digital Subscriber Line</i> . Tecnología de banda ancha, que utiliza la línea telefónica, sin interrumpir la señal de tono de marcado de teléfono.
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i> . Técnica de acceso que consiste en realizar la comunicación a través de diferentes frecuencias portadoras, una para el canal de subida y otra para el canal de bajada.
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> . Algoritmo eficiente que permite calcular la transformada de Fourier discreta y su inversa.
FTTP	<i>Fiber To The Premises</i> . Tecnología de telecomunicaciones donde se utilizan cables de fibra óptica para conectar el equipo de distribución que se encuentra más cercano al usuario destinatario de la conexión directamente a la red principal de telecomunicaciones.
FTTB	<i>Fiber To The Building</i> . En esta tecnología la conexión llega hasta un edificio y de ahí es distribuida entre los diversos clientes del edificio.
Half-Duplex	Protocolo de envío de información bidireccional pero no simultáneo.
IEEE 802.16	Grupo de trabajo en estándares de acceso inalámbrico de banda ancha el cual, desarrolla normas y prácticas recomendadas, para apoyar el desarrollo y despliegue de redes de área metropolitana inalámbrica de banda ancha.
IEEE 802.16d	Estándar en el que se basa WiMAX para ofrecer el servicio de banda ancha fijo.
IEEE 802.16e	Estándar que adopta WiMAX para ofrecer el servicio de banda ancha móvil.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Organismo autónomo del gobierno mexicano, encargado de coordinar los sistemas y servicios nacionales de Estadística y de Información Geográfica, así como producir la información estadística y geográfica de interés nacional.
Línea dedicada	<i>Leased line</i> . Conexión telefónica permanente entre dos puntos, utilizada para brindar servicios de Internet, datos o telefonía. Usualmente es utilizada por empresas que tienen oficinas geográficamente distantes.

LMDS	<i>Local Multipoint Distribution Service</i> . Tecnología de comunicación vía radio inalámbrica que permite, gracias a su ancho de banda, el despliegue de servicios fijos de voz, acceso a internet, comunicaciones de datos en redes privadas, y video bajo demanda.
MMDS	<i>Multichannel Multipoint Distribution Service</i> . Tecnología de comunicaciones inalámbricas utilizada para el establecimiento de una red de banda ancha de uso general o, más comúnmente, como método de recepción alternativo para la programación por cable, opera en la banda de 2GHz a 3GHz.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> . Agencia espacial norteamericana.
OCDE	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i> . Organización para la Cooperación y el desarrollo Económico, es una organización de cooperación internacional compuesta por 30 Estados, cuyo objetivo es coordinar sus políticas económicas y sociales.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> . Técnica de modulación multiportadora que consiste en enviar los datos en diferentes portadoras a distintas frecuencias ortogonales. Logrando tasas altas de transmisión y robustez al desvanecimiento debido a multitrayectorias.
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access</i> . Técnica de acceso basada en OFDM que consiste en asignar un subconjunto de subportadoras a cada usuario individual.
One-slope	Una pendiente. Modelo que consiste en aproximar una serie de datos experimentales a la ecuación de una recta.
PCS	<i>Personal Communications Service</i> . Es el nombre para la banda de 1900MHz, usada para los servicios de telefonía móvil digital en Canadá, México y los Estados Unidos.
SCT	Secretaria de Telecomunicaciones y Transporte. Secretaría mexicana dedicada a regular el transporte y las telecomunicaciones en México.
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i> . Es un proyecto internacional liderado por Estados Unidos a través de la <i>National Geospatial-</i>

*Intelligence Agency* y la NASA, que ofrece modelos digitales de elevación de la tierra.

TDD	<i>Time Division Duplex</i> . Técnica de acceso que utiliza diferentes ranuras de tiempo en una sola frecuencia. Asigna una ranura para la transmisión directa y otra para la transmisión inversa.
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación. Según la OCDE dispositivos que capturan, transmiten y despliegan datos e información electrónica, que apoyan, el crecimiento y desarrollo económico de la industria manufacturera y de servicios.
USGS	<i>United States Geological Survey</i> . Departamento de Geología de los Estados Unidos.
WiBro	<i>Wireless Broadband</i> . Tecnología de banda ancha inalámbrica, basada en el estándar IEEE 802.16e, para aplicaciones móviles. Desarrollada por empresas Coreanas.
Wi-Fi	Tecnología de comunicación inalámbrica basada en los estándares de la familia IEEE 802.11, para crear redes de área local y ofrecer servicios de transferencia de datos como Internet.
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> . Tecnología de banda ancha inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.16.