



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

**ESTUDIO INSTRUMENTAL DE PROPAGACIÓN Y COMPORTAMIENTO
DINÁMICO BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.16**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA (COMPUTACIÓN)

PRESENTA:
IVÁN ANDRADE BARUCH

TUTOR
DR. VÍCTOR RANGEL LICEA
FACULTAD DE INGENIERÍA - UNAM

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado:

Presidente: Dr. Gerardo Vega Hernández
Vocal: Dr. Víctor Rangel Licea
Secretario: Dr. Javier Gómez Castellanos
Suplente: Dr. Héctor Benítez Pérez
Suplente: Dr. Jorge Luis Ortega Arjona

Lugar donde se realizó la tesis: México, D.F.

Tutor de Tesis
Dr. Víctor Rangel Licea

Dedicatoria

*A mis padres: Reyna y Raúl
por los valores y la educación que me han dado y
por el apoyo y la paciencia que me han brindado.*

*A mis hermanos: Luis, Rodolfo y Sergio
por el apoyo que me han brindado y
por hacer esta vida más grata.*

*A mi familia y amigos
por todos los momentos que compartieron
conmigo, por sus consejos y el apoyo que
siempre me han dado.*

Agradecimientos

A la UNAM

Por darme la oportunidad de ser parte de ella, por los conocimientos y valores que he adquirido y que me han ayudado en mi formación personal y profesional.

Al Dr. Víctor Rangel Licea

Asesor de esta tesis, por el apoyo, la asesoría y la paciencia brindada durante el desarrollo de la misma.

A CONACYT

Por la beca otorgada durante mis estudios en la maestría y por el apoyo recibido por el proyecto CONACYT 105279 “Diseño de técnicas de reservación de capacidad en redes inalámbricas de banda ancha móviles”.

A la DGAPA-UNAM

Por el apoyo recibido para la realización de esta tesis por parte de los proyectos de investigación PAPIIT No. IN114713 “Diseño y análisis de algoritmos de calendarización en redes LTE y WiMAX” y No. IN108910 “Diseño de algoritmos de reservación de capa cruzada en redes móviles y mesh de banda ancha”.

Resumen

En este trabajo de investigación se realizó un estudio instrumental de propagación y de comportamiento dinámico basado en el estándar IEEE 802.16. Para poder realizar dicho estudio, primero se tomaron mediciones de la relación señal a ruido (SNR) y del indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI) en diferentes lugares a diferentes distancias (distancia entre la estación base y la estación suscriptora).

Para el estudio del comportamiento dinámico se calculó el “*Throughput*” máximo (a nivel de capa MAC) que puede alcanzar la red WiMAX que se está utilizando. Posteriormente se divide el terreno analizado por secciones, dependiendo de la modulación y tasa de codificación obtenida en cada una de ellas. Con esto se puede saber teóricamente la capacidad que puede soportar los canales *Downlink* y *Uplink* dependiendo del lugar en que se encuentre o se quiera colocar una estación suscriptora.

En el estudio de propagación se hizo la comparación de las gráficas de “SNR Vs. Distancia” dadas por el modelo ERCEG y la obtenida en los datos experimentales, llegando a la conclusión de que ninguno de los terrenos propuestos en el modelo ERCEG corresponde al terreno analizado. Por esta razón se realiza un ajuste en las variables de las fórmulas del modelo ERCEG y se agrega un nuevo tipo de terreno.

Índice general

Índice de figuras	15
Índice de tablas	19
1. Introducción	21
1.1. Antecedentes	21
1.2. Planteamiento del problema	22
1.3. Objetivo	22
1.4. Relevancia y Contribución del Trabajo	23
1.5. Estructura de la tesis	23
2. Estado del Arte	25
2.1. Evolución de las Redes de comunicaciones	25
2.1.1. Primera Generación (1G)	25
2.1.2. Segunda Generación (2G)	26
2.1.3. Tercera Generación (3G)	28
2.1.4. Cuarta Generación (4G)	29
2.2. Tipos de Redes Inalámbricas de Banda Ancha	31
2.2.1. Bluetooth	31
2.2.2. Wi-Fi	32
2.2.3. Redes celulares 3G	32
2.2.4. WiMAX	33
2.2.5. LTE	33
2.3. Historia del Estándar IEEE 802.16	34
2.4. Trabajos relacionados	35

3. Estándar IEEE 802.16	37
3.1. Pila de Protocolo	38
3.2. Capa Física	38
3.2.1. Posibles Capas Físicas	38
3.2.2. Modulación y Codificación Adaptativa (AMC)	40
3.3. SubCapa MAC	42
3.3.1. Subcapa MAC de Servicios Específicos	42
3.3.2. Subcapa MAC de Parte Común	43
3.3.3. Subcapa MAC de Seguridad	43
3.4. Flujos de Servicios	43
3.5. Servicios de Calendarización	44
3.6. Mecanismos de solicitud y asignación de ancho de banda	46
3.6.1. Peticiones (Requests)	46
3.6.2. Concesiones (Grants)	46
3.6.3. Consulta (Polling)	47
3.7. WirelessMAN-OFDM PHY	48
3.7.1. Descripción de un símbolo OFDM	48
3.7.2. Parámetros del símbolo OFDM y de la señal transmitida	49
4. Propagación	53
4.1. Propiedades del canal de radio	53
4.2. Modelos de propagación para WiMAX	55
4.2.1. Modelo SUI básico o Modelo ERCEG	56
4.2.2. Modelo ERCEG con factor de corrección de frecuencia	57
4.2.3. Reducción del modelo ERCEG con corrección de frecuencia al caso unicolor	58
4.2.4. Modelo SUI extendido	59
4.3. Ecuaciones adicionales	60
5. Descripción del equipo instrumental	63
5.1. Estructura física de una red WiMAX	64
5.2. Descripción de los equipos WiMAX	65
5.2.1. Descripción de la BS	65

5.2.2. Descripción de la SS	67
5.3. Configuración de los equipos	68
5.3.1. Configuración de la BS	68
5.3.2. Configuración del SU-I	71
5.4. Configuración de los enlaces de datos	72
5.4.1. Registro del SU-I	73
5.4.2. Creación de la Clase de Servicio	75
5.4.3. Creación de los Flujos de Servicio	77
5.4.4. Creación de los clasificadores	78
5.5. Implementación del escenario	80
5.6. Recolección de Datos de campo	83
6. Comportamiento Dinámico	85
6.1. Cálculo teórico del throughput	85
6.1.1. Descripción de un frame OFDM	85
6.1.2. Tiempo de un símbolo OFDM	87
6.1.3. Símbolos usados para datos por canal	88
6.1.4. Throughput por enlace	90
6.2. Tasa de transferencia teórica garantizada	92
6.2.1. Máxima tasa de transferencia teórica garantizada	93
7. Análisis de los datos Teóricos y Experimentales	97
7.1. Procesamiento y Análisis de los datos	97
7.1.1. Datos teóricos	97
7.1.2. Datos experimentales	102
7.2. Ajuste de parámetros	117
8. Aplicaciones	123
8.1. Corrección del ajuste de las variables para su uso en OPNET	123
8.2. Modificación del Código en OPNET	126
9. Conclusiones	131
9.1. Contribución	131
9.2. Trabajos futuros	132

9.3. Conclusiones finales 132

Bibliografía **133**

Índice de figuras

3.1. Pila de protocolo del estándar IEEE 802.16.	38
3.2. Subportadoras de un símbolo OFDM.	39
3.3. Modulación Adaptativa.	41
3.4. Estructura de tiempo de un símbolo OFDM.	48
4.1. Efectos del canal de radio.	54
5.1. Estructura física básica de una red WiMAX.	64
5.2. Estación Base.	65
5.3. Características del panel frontal.	66
5.4. Modem y antena.	67
5.5. Unidad Suscriptor para Interiores.	67
5.6. Características de la Unidad Suscriptor para Interiores.	68
5.7. Información General de la BS.	69
5.8. Configuración de la Interfaz Inalámbrica.	70
5.9. Reconocimiento del SU-I en la BS.	73
5.10. Proceso de registro del SU-I.	74
5.11. Registro del SU-I terminado.	74
5.12. Proceso de guardado de configuraciones.	75
5.13. Creación de la Clase de Servicio.	76
5.14. Clases de Servicio.	76
5.15. Creación de los Flujos de Servicio.	77
5.16. Flujos de Servicio.	78
5.17. Creación de los Clasificadores.	79
5.18. Clasificadores.	79

5.19. Unidad interna de la BS WiMAX.	80
5.20. Unidad externa de la BS WiMAX.	81
5.21. SS conectada usando un inversor de voltaje.	82
5.22. SS conectada usando un No-Break.	82
6.1. Frame OFDM.	86
6.2. Subframe DL.	86
6.3. Subframe UL.	87
6.4. Modulación con tasa de codificación Vs. Distancia.	93
6.5. Secciones según la Modulación y tasa de codificación.	94
6.6. Mapa de mediciones seccionado.	95
7.1. Modelos de propagación ERCEG (Prx Vs. Distancia).	101
7.2. Modelos de propagación ERCEG (SNR Vs. Distancia).	102
7.3. Regiones seleccionadas para analizar.	102
7.4. Mapa de la mediciones tomadas en la región 3.	103
7.5. Gráfica de los valores del SNR recabados usando una camioneta.	104
7.6. Gráfica de los valores del P_{rx} (Downlink) recabados usando una camioneta.	104
7.7. Gráfica de los valores del P_{rx} (Uplink) recabados usando una camioneta.	105
7.8. Gráfica de la comparación de N Teórico y Experimental usando una camioneta, tomando el RSSI del Downlink.	106
7.9. Gráfica de la comparación de N Teórico y Experimental usando una camioneta, tomando el RSSI del Uplink.	107
7.10. Comparación entre las mediciones experimentales y teóricas.	108
7.11. Aproximación del comportamiento del terreno.	108
7.12. Propuesta.	109
7.13. Comparación de los datos experimentales y los datos teóricos usando la propuesta.	110
7.14. Ajuste del defasamiento de los datos.	110
7.15. Comparación de los datos experimentales y los datos teóricos usando el modelo ERCEG Extendido.	111

7.16. Comparación de los datos usando la primera propuesta en el modelo ERCEG Extendido.	112
7.17. Gráfica de los valores del SNR recabados usando un diablito.	113
7.18. Gráfica de los valores del P_{rx} (Downlink) recabados usando un diablito.	113
7.19. Gráfica de los valores del P_{rx} (Uplink) recabados usando un diablito.	114
7.20. Gráfica de la comparación de N Teórico y Experimental usando un diablito, tomando el RSSI del Downlink.	115
7.21. Gráfica de la comparación de N Teórico y Experimental usando un diablito, tomando el RSSI del Uplink.	116
7.22. Comparación entre las mediciones tomadas a diferentes alturas.	117
7.23. Comparación entre los modelos teóricos y el experimental quitando el offset.	120

Índice de tablas

3.1. Modulación y Codificación respecto a SNR mínima.	41
3.2. Parámetros del símbolo OFDM.	51
4.1. Parámetros utilizados para los modelos ERCEG.	57
6.1. Tamaño de los campos de control.	87
6.2. Modulación y Codificación respecto a SNR mínima.	91
6.3. Modulación y Codificación respecto a SNR mínima.	92
7.1. Parámetros utilizados para obtener los modelos ERCEG.	98
7.2. Comportamiento de γ	120
7.3. Parámetros utilizados para los modelos ERCEG.	121

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

La tecnología inalámbrica de banda ancha basada en el estándar IEEE 802.16, nació con el fin de transmitir datos a altas velocidades. Para impulsar esta tecnología fue creado un foro técnico para certificar productos basados en este estándar, denominado WiMAX Forum (Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum^{*}), con ello esta tecnología presenta uno de los sistemas de comunicación más prometedores.

El análisis del comportamiento dinámico de este tipo de red nos da una idea clara de la manera en que deben de comportarse, para poder hacer una comparación con el estudio de propagación que se llevará a cabo.

Existen algunos estudios de propagación teóricos y experimentales hechos sobre el estándar 802.16, sin embargo dado que es una tecnología que está sobresaliendo actualmente y que trata de implementarse en varios lugares a nivel nacional (que es lo que más nos concierne), es necesario hacer más estudios para poder optimizar el uso y la instalación de dichos sistemas.

Algunos de los trabajos sobresalientes para el desempeño de esta tesis que se tomaron

^{*}En la página 140 se muestra el glosario de términos.

en cuenta son tesis hechas basadas en esta tecnología, orientadas a las dos tareas que se plantean en esta tesis que son: el estudio de propagación y el estudio del comportamiento dinámico.

1.2. Planteamiento del problema

Al hacer un estudio de propagación existen varios problemas muy grandes, uno de ellos es que al tratar de hacer un estudio teórico se debe de elegir entre 3 tipos de terrenos y la mala elección del tipo de terreno puede llevarnos a un estudio erróneo; otro problema se debe al espacio, es decir, generalmente se trata de colocar las antenas en los lugares más elevados, sin embargo dichos lugares pudieran ser ya ocupados por alguna otra persona o empresa, por ello es importante saber la conveniencia de colocar nuestra antena a determinada altura, otro problema es la toma de decisión en cuanto al tipo de equipo que usaremos, es decir, dispositivos Indoor o dispositivos Outdoor; un problema más es saber el “*throughput*” (máxima tasa de transmisión de datos a nivel de capa MAC) que se puede asignar a los usuarios dependiendo de la distancia a la que se encuentre de la Radio Base o dependiendo del nivel de señal (SNR) que tenga en su ubicación.

1.3. Objetivo

Obtener un estudio de propagación real, para posteriormente compararlo con el modelo de propagación ERCEG (tomando en cuenta los 3 tipos de terrenos que especifica el modelo). Modificar los parámetros que varían dependiendo del tipo de terreno para que el modelo ERCEG pueda predecir los varoles obtenidos en el estudio de una manera más exacta. De igual manera se modificarán los parámetros que tiene programados el simulador OPNET modeler para poder hacer simulaciones del terreno analizado con resultados más exactos.

Otro de los objetivos de esta tesis es realizar un análisis detallado del comportamiento dinámico de una red WiMAX que permita caracterizarla. Algunos de los resultados que se pretende obtener son:

- Estimación de la máxima capacidad de transmisión de datos o *throughput* sobre los enlaces *Uplink* y *Downlink*.
- Obtener la máxima capacidad de transmisión de datos o *throughput* de los usuarios, dependiendo de su ubicación.

1.4. Relevancia y Contribución del Trabajo

El tipo de investigación será mixta, es decir, será documental de tal manera que aporte más conocimiento a esta área de trabajo; y será de campo, puesto que obtendremos valores medidos en un escenario de trabajo real.

Los datos se obtendrán haciendo mediciones por algunos lugares dentro y en los alrededores de la localización de nuestra red celular, utilizando una estación subscritora, la radio base, una laptop, entre otras cosas.

Dentro de las redes inalámbricas de banda ancha, este estudio de propagación provee de un nuevo tipo de terreno, es decir, diferente de los propuestos por el modelo ERCEG. Desde el punto de vista de computación, se provee forma de modificar el código de algún simulador (mientras el autor lo permita) para poder obtener resultados más apegados a la realidad y poder así realizar estudios teóricos más exactos para poder optimizar el uso de los recursos y ayudar en la toma de decisiones acerca de la implementación de esta tecnología.

1.5. Estructura de la tesis

La tesis está dividida en 9 capítulos. En el capítulo 2 se describe el *Estado del Arte*, es decir, de manera breve se describe como surgen las redes inalámbricas de banda ancha, como han evolucionado y la tendencia que tienen.

En el capítulo 3 se describen los componentes más importantes del Estándar IEEE 802.16, a fin de entender en gran medida como funciona la tecnología basada en dicho estándar, para así poder operar los equipos WiMAX y lograr un buen análisis

de los datos que se obtengan.

En el capítulo 4 se describen algunos modelos de propagación, haciendo énfasis en los modelos de propagación ERCEG, analizando los probables problemas que pudieran presentarse al momento de escoger un modelo teórico.

En el capítulo 5 se describe la estructura física de una red WiMAX, así como el funcionamiento de cada uno de los equipos que componen dicha red (solo los equipos utilizados en esta tesis), se describe la manera de configurarlos para que funcione la red. Posteriormente se muestra la implementación del escenario usado para el desarrollo de esta tesis y la manera en que se hizo la recolección de los datos que se necesitaron.

En el capítulo 6 se hace un breve análisis del comportamiento dinámico basado en el estándar IEEE 802.16, haciendo énfasis en el *throughput* teórico que se puede alcanzar dependiendo de la modulación que a su vez dependerá del SNR (el cual mediremos).

En el capítulo 7 se hace un análisis de los datos teóricos basados en los modelos de propagación teóricos, así como un análisis de los datos obtenidos experimentalmente.

En el capítulo 8 se muestra un cambio en el código del simulador OPNET para que se puedan hacer predicciones más reales basadas en un terreno real (el de Ciudad Universitaria en este caso).

Por último, en el capítulo 9 se muestra la contribución que aporta la tesis, los trabajos futuros que pudieran derivarse de esta y las conclusiones finales.

Capítulo 2

Estado del Arte

Las redes inalámbricas de banda ancha se han convertido en una pieza importante en la vida de las personas gracias a su versatilidad y facilidad de implementación. Su popularidad ha incrementado la demanda de este tipo de tecnología, que a su vez se traduce en la necesidad de crear diversas tecnologías que brinden un mejor servicio.

En este capítulo se explica de manera breve la historia de las redes de telecomunicaciones, desde sus inicios hasta la época actual; se describen diversas tecnologías que brinda conexiones inalámbricas de banda ancha y por último se describe la historia del estándar IEEE 802.16 a fin de mostrar como ha ido evolucionando dicho estándar, mostrar sus mejoras y hacia donde se dirige.

2.1. Evolución de las Redes de comunicaciones

A continuación se describe de manera breve como han ido evolucionando las redes de comunicaciones a través de los años, tomando en cuenta que actualmente se describen por generaciones.

2.1.1. Primera Generación (1G)

La primera generación se caracterizó por ser puramente analógica y solamente se usaba para voz, donde las conexiones eran de muy baja calidad, dado que la velocidad que tenían era baja (2400 bauds). En cuanto a la transferencia entre celdas,

era muy imprecisa ya que contaban con una baja capacidad basadas en FDMA (Frequency Division Multiple Access), además la seguridad no existía. La tecnología predominante de esta generación es AMPS (Advanced Mobile Phone System) [21].

El primer sistema celular analógico empezó a operar en Japón en 1979 desarrollado por la compañía de Telefonía y Telegrafía de Japón (NTT).

En Norteamérica a partir de 1981 comenzó a utilizarse el sistema AMPS, el cual ofrecía 666 canales divididos en 624 canales de voz y 42 canales de señalización de 30 Khz cada uno

Europa introduce en 1981 el sistema Nordic Mobile Telephone System o NMTS450, el cual empezó a operar en Dinamarca, Suecia, Finlandia y Noruega, en la banda de 450 MHz.

En 1985 Gran Bretaña, a partir de AMPS, adoptó el sistema TACS (Total Access Communications System), el cual contaba con 1000 canales de 25 Khz cada uno y operaba en la banda de 900 MHz.

En esta década también aparecen otros sistemas de primera generación como el C-Netz estándar Alemán y French Radiocom 2000 de Francia, entre otros.

2.1.2. Segunda Generación (2G)

La segunda generación se caracterizó por ser digital, a diferencia de la primera generación que era analógica. La digitalización trajo consigo la reducción de tamaño, costo y consumo de potencia en los dispositivos móviles, así como nuevos servicios tales como identificador de llamadas, envío de mensajes cortos (SMS Short Message Service), mensajes de voz, conferencias tripartitas, entre otros [22].

Dentro de estos sistemas de telefonía celular se logró soportar una velocidad de información de 9.6 kbits/s, siendo esta velocidad mayor a la alcanzada por los equipos de la primera generación. Sin embargo, aún era muy limitada para la transmisión de datos. Se logró un avance significativo en seguridad, calidad de voz y de roaming.

En 1982, cuando aparecieron los primeros servicios celulares comerciales, la CEPT (Conférence Européenne des Postes et Télécommunications) tomó la iniciativa de poner en marcha un grupo de trabajo, llamado Groupe Spécial Mobile (GSM), encargado de especificar un sistema de comunicaciones móviles común para Europa en las banda de 900 MHz, banda que había sido reservada por la World Administrative Radio Conference en 1978. El GSM comenzó como una norma europea para unificar sistemas móviles digitales y fue diseñado para sustituir a más de diez sistemas analógicos en uso y que en la mayoría de los casos eran incompatibles entre sí. Después de unas pruebas de campo en Francia de 1986 y de la selección del método de acceso Time Division Multiple Access (TDMA) en 1987, 18 países firmaron en 1988 un acuerdo de intenciones (MOU: Memorandum of understanding): En este documento los países firmantes se comprometían a cumplir las especificaciones, a adoptar este estándar único y a poner en marcha un servicio comercial GSM, que ofrece seguimiento automático de los teléfonos móviles en su desplazamiento por todos los países. Conforme se desarrolló, GSM mantuvo el acrónimo, aunque en la actualidad signifique Global System for Mobile Communications[22].

En Norteamérica, el objetivo principal de un nuevo estándar digital era aumentar la capacidad dentro de la banda de 800 MHz existente. Un prerrequisito es que los teléfonos móviles debían funcionar con los canales de habla analógicos ya existentes y con los nuevos digitales (Dual Mode). A partir de este momento se empleó el término Digital AMPS (D-AMPS) que se refiere a IS-54B, y que define una interfaz digital con componentes heredados de AMPS. La especificación IS-36 es una evolución completamente digital de D-AMPS. A causa de estos requisitos, fue natural el elegir un estándar TDMA de 30 KHz puesto que los sistemas analógicos existentes trabajan ya con esta anchura de canales. En este sistema se transmiten tres canales por cada portadora de 30 Khz.

A principios de los 90, aparece un nuevo estándar el cual utiliza el método de acceso CDMA (Code Division Multiple Access). El estándar CDMAOne o IS-95, fue una tecnología desarrollada por Qualcomm y consiste en que todos usan la misma frecuencia al mismo tiempo separándose las conversaciones mediante códigos.

2.1.2.1. 2.5G

Una fase intermedia conocida como 2.5G fue introducida a finales de los 90/s. Esta fase utilizaba el estándar GPRS, el cual permitía a los usuarios enviar datos con imágenes y/o gráficos. La importancia de este servicio creció conjuntamente con el desarrollo del Internet y los Protocolos de Internet (IP). La red EDGE es un ejemplo de tecnología 2.5G.

Esta generación corresponde a las mejoras tecnológicas que se hicieron de las redes 2G con tendencia a entregar capacidades de 3G con una velocidad que puede alcanzar los 384 kbits/s, ya adecuada para muchas aplicaciones de transferencia de datos[30].

2.1.3. Tercera Generación (3G)

La revolución de los sistemas de tercera generación permitió a los usuarios el uso de aplicaciones de audio, imágenes y vídeo. Es posible ver video en *streaming* (en tiempo real, sin que el vídeo se detenga) y hacer uso de las vídeollamadas, aunque realmente ya en la práctica este tipo de actividades se ven restringidas por los cuellos de botella en la red y el alto uso de esta por parte los usuarios.

Los avances que en materia de sistemas de tercera generación adelanta la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), a finales de los años ochenta, se denominaron en un principio como Futuros Sistemas Públicos de Telecomunicaciones Móviles Terrestres (FPLMTS-Future Public Land Mobile Telecommunication System) Actualmente se le ha cambiado de nombre y se habla del Sistema de Telecomunicaciones Móviles Internacional (IMT-2000, International Mobil Telecommunication-2000) creado con el objetivo de valorar y especificar los requisitos de las normas celulares del futuro para la prestación de servicios de datos y multimedia a alta velocidad[5].

2.1.3.1. IMT (International Mobil Telecommunications)

IMT-2000 es una norma de la ITU para los sistemas de la 3a. generación que proporciona acceso inalámbrico a la infraestructura de telecomunicaciones global por medio

de los sistemas satelitales y terrestres, para dar servicio a usuarios fijos y móviles en redes públicas y privadas actualmente.

Los requerimientos para los sistema de tercera generación son[20]:

- Alta velocidad en transmisión de datos, hasta 144 Kb/s, velocidad de datos móviles (vehicular); hasta 384 Kb/s, velocidad de datos portátil (peatonal) y hasta 2 Mb/s, velocidad de datos fijos (terminal estático).
- Transmisión de datos simétrica y asimétrica.
- Servicios de conmutación de paquetes y en modo circuito, tales como tráfico Internet (IP) y video en tiempo real.
- Calidad de voz comparable con la calidad ofrecida por sistemas alámbricos.
- Mayor capacidad y mejor eficiencia del espectro con respecto a los sistemas actuales.
- Capacidad de proveer servicios simultáneos a usuarios finales y terminales.
- Incorporación de sistemas de segunda generación y posibilidad de coexistencia e interconexión con servicios móviles por satélite.
- Itinerancia internacional entre diferentes operadores (Roaming Internacional).

2.1.4. Cuarta Generación (4G)

4G es el término empleado para referirse a la cuarta generación de servicios inalámbricos móviles que definió la ITU y su Sector de Radiocomunicaciones (ITU-R) y estableció como definición acordada y aceptada globalmente en IMT-Advanced.

La ITU desarrolló requisitos para una tecnología a considerarse IMT-Advanced, que es la tecnología inalámbrica de próxima generación. Un sistema celular IMT-Advanced debe cumplir los siguientes requisitos[1]:

- ★ Estar basado en una red totalmente IP conmutada por paquetes.

- ★ Proveer tasas de datos máximas de hasta aproximadamente 100 Mbit/s para alta movilidad, como en el acceso móvil, y hasta aproximadamente 1 Gbps para baja movilidad, como en el acceso nómada / local inalámbrico, según los requisitos de la ITU.
- ★ Compartir dinámicamente y utilizar los recursos de red para dar soporte a más usuarios simultáneos por celda.
- ★ Ancho de banda de canal escalable 5MHz-20MHz, opcionalmente hasta 40 MHz.
- ★ Eficiencia espectral máxima de 15 bit/s/Hz en el enlace descendente y de 6.75 bit/s/Hz en el enlace ascendente (lo que significa que debe ser posible lograr 1 Gbps en el enlace descendente en menos de 67 MHz de ancho de banda).
- ★ Eficiencia espectral del sistema de hasta 3 bit/s/Hz/celda en el enlace descendente y 2.25 bit/s/Hz/celda para uso en interiores.
- ★ Traspasos suaves entre redes heterogéneas.
- ★ Capacidad de ofrecer alta calidad de servicio para soporte multimedia de próxima generación.

En septiembre de 2009, se presentaron propuestas tecnológicas a la ITU como candidatas a 4G. Básicamente, las propuestas se basaban en dos tecnologías:

- LTE-Advanced estandarizada por el 3GPP.
- 802.16m estandarizada por el IEEE (es decir, WiMAX móvil).

En diciembre de 2010, la ITU difirió el debate sobre las tecnologías de 4G al afirmar lo siguiente en un comunicado de prensa[2]:

Luego de una evaluación detallada contra criterios técnicos y operativos exigentes, la ITU determinó que “LTE-Advanced” y “WirelessMAN-Advanced” deben recibir la denominación oficial de IMT-Advanced. Al igual que las tecnologías más avanzadas definidas actualmente para comunicaciones móviles globales por banda ancha, IMT-Advanced es considerada “4G”, aunque se reconoce que este término, aunque no

esté definido, puede aplicarse también a las antecesoras de estas tecnologías LTE y WiMAX, y a otras tecnologías de 3G evolucionadas que brindan un nivel sustancial de mejora del desempeño y las capacidades respecto de los sistemas iniciales de tercera generación ya desplegados. Las especificaciones detalladas de las tecnologías IMT-Advanced se brindan en una nueva Recomendación ITU-R desarrollada en el 2012[2].

2.2. Tipos de Redes Inalámbricas de Banda Ancha

Hoy en día los usuarios trantan de satisfacer sus necesidades de comunicación de diferentes maneras o utilizando diferentes tipos de Redes. En la actualidad las redes alámbricas nos proporcionan un número muy grande de maneras de comunicarnos, ya sea por voz (teléfono), datos (Internet en nuestra oficina u hogar que llega mediante un cable), etc. Sin embargo, por la necesidad de estar siempre en movimiento se buscan otras alternativas como es el uso del celular, el tráfico de datos en los celulares y en las laptops, etc. Para esto se hace uso de distintos tipos de redes inalámbricas que aunque satisfacen muchas necesidades, en la actualidad no solamente se requiere estar en movimiento si no que también se requiere del flujo de grandes cantidades de datos, por lo cual se opta por el uso de redes inalámbricas de banda ancha, como algunas de las que se mencionan a continuación.

2.2.1. Bluetooth

La tecnología Bluetooth está basada en el estándar IEEE 802.15.1, diseñada en principio como una conexión inalámbrica de corto alcance (máximo de 10 m), cuya velocidad de transferencia de archivos no era mayor a 1Mb/s; en su versión 2.1 maneja una transferencia de datos de 3 Mb/s teóricos y 2.1 Mb/s en la práctica con un consumo de energía bajo y un alcance mayor (30 m).

Aunque la versión más usada actualmente es la 2.1, existen otras 2 versiones más recientes, la 3.0 y la 4.0. La versión 3.0 combina la tecnología Bluetooth y Wi-Fi, por lo cual alcanza tasas de transferencia mayores a 24 Mb/s y es compatible con las versiones anteriores[7]. La versión 4.0 es mejor conocida como “de baja energía”

(bluetooth low energy), la cual maneja una velocidad teórica de 1 Mb/s pudiendo utilizar entre el 1% y el 50% de la energía que utiliza un dispositivo bluetooth versión 2.1 (dependiendo del uso)[8]. Esta versión no es compatible con las anteriores, sin embargo, las especificaciones de Bluetooth 4.0 permiten crear dispositivos que implementen o no ambos sistemas (los de baja energía y los clásicos), aquellos que implementan ambos son llamados "Dispositivos Bluetooth 4.0 dual-mode"[6].

2.2.2. Wi-Fi

La tecnología Wi-Fi está basada en el estándar IEEE 802.11, Wi-Fi Alliance desarrolla dicho estándar y certifica los dispositivos basados en el mismo. Los estándares IEEE 802.11b, IEEE 802.11g e IEEE 802.11n disfrutaron de una aceptación internacional debido a que la banda de 2.4 GHz está disponible casi universalmente, con una velocidad de hasta 11 Mbit/s, 54 Mbit/s y 600 Mbit/s, respectivamente, además de la inmensa variedad de dispositivos que utilizan esta tecnología [12][4].

Actualmente se está por terminar el desarrollo del estándar IEEE 802.11ac (puesto que ya existen algunos dispositivos basados en este estándar), mediante el cual se pueden alcanzar velocidades superiores a las de 1Gb/s en bandas por debajo de 6GHz, además se terminó el desarrollo del estándar IEEE 802.11ad, mediante el cual se esperan velocidades superiores a los 7Gb/s utilizando la banda de 60GHz (se usará solo para LOS puesto que la señal no penetra las paredes)[14][13].

Este tipo de redes se implementa en casi todas partes, es decir, podemos verlas en los hogares para poder tener conexión a Internet en casi cualquier parte de la casa, en las escuelas para poder brindarles servicios de Internet y servicios propios de la escuela a los alumnos, entre muchos otros lugares.

2.2.3. Redes celulares 3G

Esta red se describe en la sección 2.1.3 de la página 28. Actualmente en México muchas compañías utilizan este tipo de redes, TELCEL y MOVISTAR son dos ejemplos de ellas.

2.2.4. WiMAX

La tecnología WiMAX está basada en el estándar IEEE 802.16, en el cual se define las características de las capas MAC y PHY sin establecer la forma ni los mecanismos para implementarlas. Es una tecnología dentro de las conocidas como tecnologías de última milla. **WiMAX forum** fue el organismo creado para proveer certificaciones, compatibilidad e interoperabilidad entre los equipos basados en este estándar[23].

Actualmente es más utilizado el estándar 802.16e-2005, que agrega movilidad a las características que ya poseía WiMAX; aunque el estándar permite operaciones en cualquier banda desde 2 hasta 66 GHz, las operaciones móviles funcionan mejor en las bandas más bajas, que son también las más demandadas y por tanto las más caras. El estándar más actual y aceptado es el 802.16m que ha sido aceptado como tecnología 4G como se menciona en la sección 2.1.4 de la página 29.

Axtel es un ejemplo de las compañías que utilizan este tipo de redes para poder ofrecer sus servicios de Internet de banda ancha y telefonía.

2.2.5. LTE

LTE (Long Term Evolution) es un estándar de la norma 3GPP, utiliza una interfaz radioeléctrica basada en OFDMA para el enlace descendente y SC-FDMA para el enlace ascendente.

El estándar más actual de esta tecnología es el LTE-Advance considerado como una mejora de LTE y actualmente descrita y aceptada como una red 4G tal y como se indica en la sección 2.1.4 de la página 29.

A finales del 2012 TELCEL hizo su lanzamiento comercial de la red 4GLTE, cubriendo las zonas de alta demanda de 9 ciudades (Distrito Federal, Tijuana, Puebla, Monterrey, Guadalajara, Querétaro, Mérida, Hermosillo y Ciudad Juárez)[29].

2.3. Historia del Estándar IEEE 802.16

Como ya se ha mencionado antes, WiMAX se desarrolla en base a las especificaciones del grupo de estándares 802.16 los cuales proporcionan las especificaciones técnicas; sin embargo, resulta necesario crear un organismo que verifique aspectos como la interoperabilidad. Es por esta razón que se crea el foro WiMAX (WiMAX forum) en junio de 2001.

El estándar IEEE 802.16 ha ido cambiando desde su primera versión en diciembre de 2001, donde se han ido añadiendo y mejorando sus características. A continuación se muestra de manera general el proceso de evolución del estándar hasta llegar a la versión actualmente considerada 4G, IEEE 802.16m.

- 802.16 Interfaz aérea de banda ancha fija original. Utiliza espectro licenciado en el rango de 10 a 66 GHz, necesita línea de vista directa. Solo para aplicaciones punto a punto. Aprobado en Diciembre de 2001.
- 802.16c Ampliación del estándar 802.16 para definir las características y especificaciones en la banda d 10 a 66 GHz. Aprobado en Diciembre de 2002.
- 802.16a Ampliación del estándar hacia la banda de 2 a 11 GHz, con sistemas NLOS y LOS, y topologías Punto a Punto y Punto a Multipunto. Aprobado en enero de 2003 y publicado en Abril de 2003.
- 802.16d Revisión del 802.16 y 802.16a para añadir los perfiles de los sistemas WIMAX y las correcciones para 2 a 11 GHz con OFDM como interfaz de aire, en soporte a los requerimientos de una versión futura 802.16e. Soporte para accesos fijos y nomadicos. Aprobado como 802.16-2004 ó 802.16d en Junio de 2004.
- 802.16e Ampliación del estándar para soporte de banda ancha inalámbrica móvil dentro y entre diferentes áreas de servicio. Soporte para accesos portables, movilidad simple y movilidad completa, con diferentes velocidades en una banda licenciada de 2 a 6 GHz con OFDMA como interfaz de aire. Aprobado como 802.16-2005 u 802.16e en Diciembre de 2005 y publicado en Febrero de 2006.

802.16m Interfaz aérea avanzada con tasa de transferencia de 100 Mbit/s móvil y 1 Gbit/s sobre punto fijo. También se conoce como Mobile WiMAX Release 2 o WirelessMAN-Advanced. Con el objetivo de cumplir con los requerimientos de ITU-R IMT-Advanced para sistemas 4G. Aprobada en Marzo de 2011 y publicada en mayo de 2011.

2.4. Trabajos relacionados

En la sección 4.2 de la página 55 se describen algunos de los trabajos relacionados con los modelos de propagación que se utilizan actualmente para las redes WiMAX.

Capítulo 3

Estándar IEEE 802.16

La tecnología basada en este estándar se ha vuelto popular debido a la facilidad que tiene para poder implementarse y a las velocidades de transmisión que maneja. Debido a esta popularidad se ha puesto mucho empeño en el desarrollo de este estándar, tal es así que actualmente el estándar IEEE 802.16m forma parte de las tecnologías llamadas 4G. Sin embargo, para poder continuar con el desarrollo de dicha tecnología hace falta mayores trabajos y estudios basados en este estándar, para lo cual se requiere de conocer la manera como funciona.

En este capítulo se describe de manera general los aspectos más importantes del estándar IEEE 802.16, las 2 capas que abarca y los servicios que posee para poder asignar calidad de servicio (Quality of Service - QoS) a los usuarios.

Se describe la capa PHY, que se encarga de establecer las conexiones físicas, se muestran las capas físicas que describe el estándar, luego se muestra como trabaja la modulación y codificación adaptativa.

Se describe la capa MAC y las subcapas que la componen, a través de las cuales se encarga de asignarle un tipo de QoS a los usuarios, entre otras características.

3.1. Pila de Protocolo

Las capas que se encuentran en la parte baja de la pila de protocolo (física, enlace de datos y red) trabajan sobre hardware, mientras que las capas superiores (transporte, sesión, presentación y aplicación) se encargan de la ejecución de software para la manipulación de los datos.

El estándar IEEE 802.16 trabaja basado en el modelo de referencia OSI, sin embargo define solo dos capas inferiores, la Física (PHY por sus siglas en inglés) y la subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC por sus siglas en inglés). La MAC es una subcapa de la capa de Enlace de Datos al igual que la subcapa de Control de enlace Lógico (LLC por sus siglas en inglés). Esta división la podemos ver en la figura 3.1.

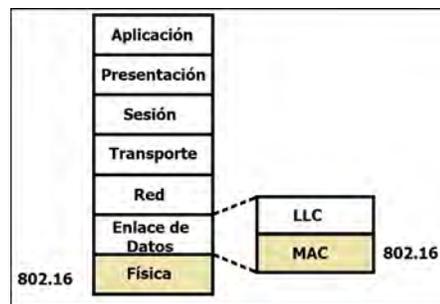


Figura 3.1: Pila de protocolo del estándar IEEE 802.16.

3.2. Capa Física

La capa PHY establece la manera en que se debe llevar a cabo la conexión física, define el tipo de señal que va a utilizarse, el tipo de modulación y demodulación, el acceso múltiple, la codificación del canal, la tecnología de las antenas, la potencia de transmisión, entre otras características físicas.

3.2.1. Posibles Capas Físicas

La capa PHY está compuesta de cinco secciones según el standar IEEE 802.16-2004[15]:

1. Red de Área Metropolitana Inalámbrica de una Sola Portadora (WMAN-SC, Wireless Metropolitan Area Network- Single Carrier).
2. Red de Área Metropolitana Inalámbrica con Acceso de una Sola Portadora (WMAN-SCa, Wireless Metropolitan Area Network- Single Carrier access).
3. Red de Área Metropolitana Inalámbrica con Multiplexaje por División de Frecuencias Ortogonales (WMAN-OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing).
4. Red de Área Metropolitana Inalámbrica con Múltiple Acceso por División de Frecuencias Ortogonales (WMAN-OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access).
5. Red de Área Metropolitana Inalámbrica de Alta Velocidad sobre bandas sin Licencia (WirelessHUMAN, Wireless High-speed Unlicensed Metropolitan Area Networks).

Para la transmisión en las capas físicas OFDM y OFDMA se hace uso de un número específico de portadoras, las cuales se dividen en subportadoras de datos, subportadoras piloto, subportadora DC y subportadoras de banda de guarda (como se muestra en la figura 3.2). El número de subportadoras totales para la capa OFDM es de 256 y en el caso de OFDMA se tiene que es escalable 128, 512, 1024 y 2048; este caso escalable se conoce en la literatura como S-OFDMA[24].

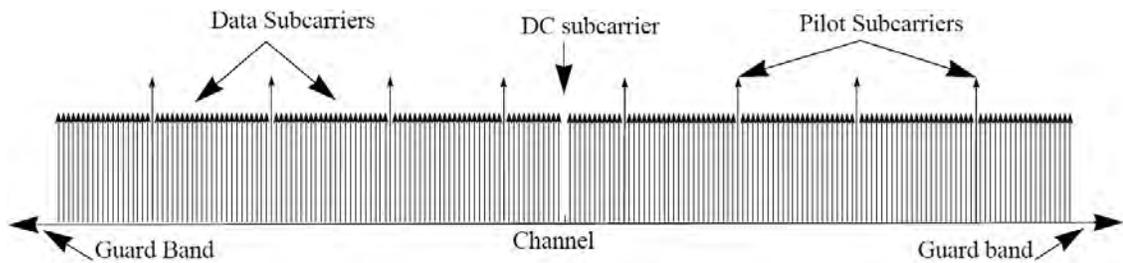


Figura 3.2: Subportadoras de un símbolo OFDM.

Cabe señalar que en el estándar IEEE 802.16-2009[17] ya no se encuentra incluida la sección 8.2 que describía WMAN-SCa. Sin embargo el estándar IEEE 802.16m[18] habla de una nueva sección para la capa PHY llamada WirelessMAN-Advanced.

Para los propósitos de esta tesis se utiliza el perfil WirelessMAN-OFDM PHY con canalización de 3.5 MHz, el cual será descrito en la última sección de este capítulo.

3.2.2. Modulación y Codificación Adaptativa (AMC)

Modulación Digital: Se define como una técnica necesaria para transmitir información (2, 4, 6 bits dependiendo del tipo de modulación) sobre una portadora mediante cambios en la amplitud y fase de la misma.

Tasa de Codificación: Se define como un mecanismo que agrega información redundante para proteger la información contenida en la portadora modulada (bits) que se transmite a través del aire, para que en caso de que una cierta cantidad de información se dañe (en el camino del Tx al Rx) se puedan detectar y corregir errores usando la información redundante.

AMC son las siglas de (Adaptive Modulation and Coding) Modulación y Codificación adaptativa. AMC permite la selección dinámica del tipo de modulación y la tasa de codificación en función de las condiciones en cada subcanal y velocidad de transmisión de datos necesarios en los dos sentidos de transmisión. AMC en los sistemas WiMAX permite mejorar el plan de la modulación de la señal. Cuando la conexión inalámbrica es de alta calidad, el aumento de la modulación y codificación se utiliza en el sistema para dar el rendimiento más alto del mismo. Cuando la señal se debilita el sistema WIMAX puede cambiar la modulación y codificación a un esquema inferior para mantener la estabilidad de conexión. La intensidad de la señal y por lo tanto el tipo de modulación y codificación dependen de la distancia a la cual se encuentre la estación suscriptora de la estación base y de la categoría del terreno (densidad de obstáculos) en donde se encuentra implementada la macro-célula WIMAX[31]. La figura 3.3 ilustra el comportamiento dinámico de AMC.

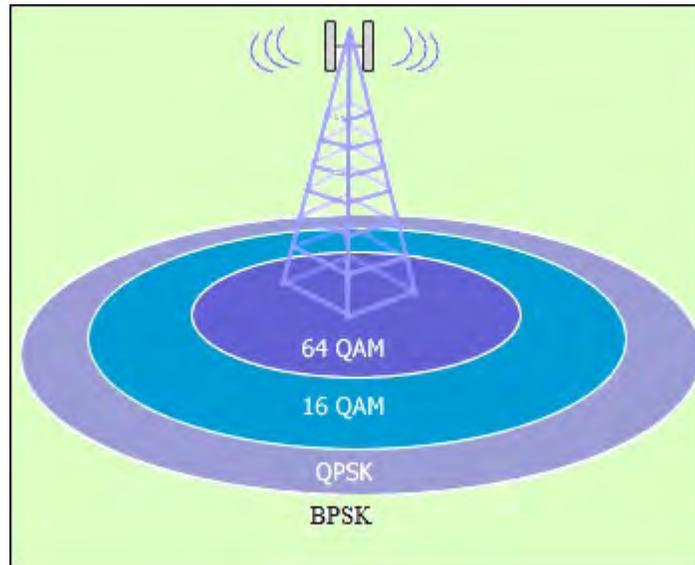


Figura 3.3: Modulación Adaptativa.

Los tipos de modulación digital que se contemplan para los sistemas WIMAX son 64QAM, 16QAM, QPSK y BPSK con las siguientes tasas de codificación promedio $3/4$, $2/3$ y $1/2$. El tipo de modulación y tasa de codificación depende de la relación señal a ruido (SNR) que cada suscriptor WIMAX alcance, como se puede ver en la tabla 3.1.

Modulación	Tasa de Codificación	SNR mín.	Bits/símbolo
64QAM	$3/4$	23	6
64QAM	$2/3$	21	6
16QAM	$3/4$	18	4
16QAM	$1/2$	15	4
QPSK	$3/4$	11	2
QPSK	$1/2$	9	2
BPSK	$1/2$	6	1

Tabla 3.1: Modulación y Codificación respecto a SNR mínima.

3.3. SubCapa MAC

Esta capa se encuentra por encima de la capa PHY y es responsable del control y multiplexaje del tráfico por el medio físico. Algunas de sus funciones más importantes son:

- Segmentar o concatenar las Unidades de Servicios de Datos (SDU, Service Data Units) que recibe de las capas superiores en Unidades de Datos de Protocolo MAC (PDU, Protocol Data Unit).
- Seleccionar el perfil de ráfaga así como el nivel de potencia que se utiliza para la transmisión de MAC PDU's.
- Retransmitir las MAC PDU's que fueron recibidas erróneamente utilizando Solicitud de Repetición Automática (ARQ, Automatic Retransmissions Requests).
- Proporcionar el control de Calidad de Servicio (QoS, Quality of Service) así como el manejo de prioridad de datos de MAC PDU's.
- Calendarizar los MAC PDU's sobre los recursos de la capa PHY.
- Proporcionar apoyo a las capas superiores para la administración de movilidad.
- Proporcionar seguridad y la administración de claves.
- Proporcionar el modo de ahorro de energía y el modo de funcionamiento de inactividad.

La capa MAC se divide en tres subcapas distintas: Subcapa de servicios específicos, subcapa de parte común y subcapa de seguridad[23].

3.3.1. Subcapa MAC de Servicios Específicos

En esta subcapa se realiza la transformación de las tramas de información que recibe de la subcapa MAC de parte común a través del MAC SAP, a unidades llamadas MAC SDU's (Service Data Units). Esto incluye la clasificación de los SDU's recibidos de la red externa y su asociación con su correspondiente SFID (Service Flow Identifier) y CID (Connection Identifier).

3.3.2. Subcapa MAC de Parte Común

Es la subcapa que provee el núcleo de la funcionalidad de la capa MAC. Entre sus funciones se encuentran acceso a la red, asignación de ancho de banda, establecimiento y administración de conexiones. Asimismo, en esta subcapa se encuentran los mecanismos de calidad de servicio que se aplican a la transmisión y calendarización de la información que viaja por la capa Física.

3.3.3. Subcapa MAC de Seguridad

La subcapa de seguridad se comunica directamente con la capa Física a través del PHY SAP y provee las funciones de autenticación, intercambio seguro de llaves y cifrado de la información.

3.4. Flujos de Servicios

Un Service Flow es un servicio MAC que proporciona transporte unidireccional a los paquetes, ya sea a los paquetes transmitidos en el uplink por la SS o a los paquetes transmitidos en el downlink por la BS. Un Service Flow está caracterizado por un conjunto de parametros QoS, tales como latencia, jitter, y garantías de rendimiento. Con el fin de estandarizar la operacion entre la SS y la BS, estos atributos incluyen detalles de como la SS solicita asignaciones de ancho de banda en el canal uplink y el comportamiento esperado del clasificador UL en la BS. Un Service Flow está caracterizado parcialmente por los siguientes atributos[15]:

- Service Flow ID: Un SFID es asignado a cada Service Flow existente. El SFID sirve como identificador principal para el Service Flow en la red. Un Service Flow tiene al menos un SFID y una dirección asociada.
- CID: Todo Service Flow admitido o activado tiene su SFID mapeado a un CID.
- ProvisionedQoSParamSet: Un conjunto de parametros QoS provistos a traves de medios que estan fuera del estandar, tales como el sistema de administración de la red.

- **AdmittedQoSParamSet:** Define un conjunto de parametros QoS para los cuales la BS (y posiblemente la SS) está reservando recursos. El principal recurso a ser reservado es el ancho de banda, pero se incluyen tambien cualquier otra memoria o recurso basado en tiempo.
- **ActiveQoSParamSet:** Define un conjunto de parametros QoS que caracterizan el servicio que está siendo proporcionado por el Service Flow. Sólo los Service Flows activos pueden transportar paquetes.
- **Authorization Module:** Una función lógica dentro de la BS que aprueba o rechaza cualquier cambio en los parametros QoS y en los clasificadores asociados con el Service Flow. Para ello, define una “envoltura” que limita los posibles valores del AdmittedQoSParamSet y el ActiveQoSParamSet.

3.5. Servicios de Calendarización

Los servicios de calendarización tienen como finalidad el ordenamiento adecuado de los paquetes para su transmisión sobre el canal de radio. Dicha tarea es administrada por el clasificador MAC, el cual es responsable de proporcionar los servicios correspondientes a cada conexión establecida por las estaciones suscriptoras. Cada conexión está asociada con un servicio simple de datos. Cada servicio de datos está asociado con un conjunto de parámetros de QoS que cuantifican aspectos de su comportamiento[16].

El estándar IEEE 802.16 soporta cinco tipos de servicios de calendarización para proporcionar QoS. A continuación se proporciona una breve descripción de cada uno de los servicios de calendarización soportados, incluyendo los parámetros QoS obligatorios que deben ser incluidos en la definición del flujo de servicio, cuando el servicio de calendarización es habilitado para dicho flujo de servicio.

- **Unsolicited grant service, UGS:** está diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real compuestos por paquetes de datos de tamaño fijo transmitidos a intervalos periódicos, tales como los T1/E1 y VoIP sin supresión de silencios. Los parámetros obligatorios QoS del flujo de servicio para este tipo de

servicio de calendarización son: Tasa Máxima de Tráfico Sostenido, Latencia Máxima, Jitter Tolerado y Políticas de Solicitud/Transmisión. Si el parámetro Tasa Mínima Reservada de Tráfico está presente debe tener el mismo valor que el parámetro Tasa Máxima de Tráfico Sostenido.

- **Extended rtPS, ertPS:** es un mecanismo de calendarización basado en la eficiencia de UGS y rtPS, diseñado para soportar flujos de servicio en tiempo real compuestos por paquetes de datos de tamaño variable transmitidos a intervalos periódicos, tales como VoIP con supresión de silencios. Los parámetros obligatorios QoS del flujo de servicio para este tipo de servicio de calendarización son: Tasa Máxima de Tráfico Sostenido, Tasa Mínima de Tráfico Reservado, Latencia Máxima, Políticas de Solicitud/Transmisión y el Intervalo de Servicio Garantizado.
- **Real-time polling service, rtPS:** está diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real compuestos por paquetes de datos de tamaño variable que son enviados a intervalos periódicos, tales como video MPEG (Motion Pictures Expert Group). Los parámetros obligatorios QoS del Service Flow para este tipo de servicio de scheduling son: Tasa Mínima Reservada de Tráfico, Tasa Máxima de Tráfico Sostenido, Latencia Máxima y Políticas de Solicitud/Transmisión.
- **Non-real-time polling service, nrtPS:** está diseñado para soportar flujos de datos tolerantes al retardo, los cuales están compuestos por paquetes de datos de tamaño variable que requieren una mínima tasa de transmisión de datos, tales como FTP (File Transfer Protocol). Los parámetros obligatorios QoS del Service Flow para este tipo de servicio de scheduling son: Tasa Mínima Reservada de Tráfico, Tasa Máxima de Tráfico Sostenido, Prioridad de Tráfico y Políticas de Solicitud/Transmisión.
- **Best effort, BE:** está diseñado para soportar flujos de datos para los cuales no se requiere un nivel mínimo de servicio, y por tanto pueden ser manejados con base en la disponibilidad de espacio. Los parámetros obligatorios QoS del Service Flow para este tipo de servicio de scheduling son: Tasa Máxima de Tráfico Sostenido, Prioridad de Tráfico y Políticas de Solicitud/Transmisión[16].

3.6. Mecanismos de solicitud y asignación de ancho de banda

Existen numerosos métodos a través de los cuales las SSs pueden enviar un mensaje de solicitud de ancho de banda a la BS. Dichos métodos permiten establecer distintos niveles de prioridad y asignación del medio para los distintos usuarios en la red[15].

3.6.1. Peticiones (Requests)

Cuando un usuario requiere transmitir información, es necesario que se le asigne un determinado ancho de banda en el canal UL. Para ello, las SSs necesitan hacer una petición a la BS solicitando que se le sea asignado el recurso necesario.

Las peticiones de ancho de banda pueden ser incrementales o agregadas. Cuando la BS recibe una solicitud incremental de ancho de banda, debe adicionar la cantidad requerida de ancho de banda a las necesidades actuales de la conexión. Cuando la BS recibe una petición de ancho de banda adicional, debe reemplazar las necesidades actuales de ancho de banda de la conexión por la cantidad solicitada de ancho de banda.

El campo Tipo en el encabezado de solicitud de ancho de banda indica si la petición es de tipo incremental o adicional. Puesto que las peticiones de ancho de banda que utilizan piggyback no tienen un campo Tipo, dichas peticiones son de tipo incremental. La naturaleza autocorrectiva del protocolo de solicitud/concesión requiere que las SSs periódicamente deban utilizar peticiones de ancho de banda de tipo adicional. El intervalo entre las solicitudes de tipo adicional depende de los parámetros QoS asignados al usuario y de la calidad del enlace. Debido a la posibilidad de colisiones, las peticiones de ancho de banda transmitidas por medio de peticiones de IE de broadcast o multicast deben ser peticiones adicionales[15].

3.6.2. Concesiones (Grants)

Una de las funciones principales de la BS es la concesión del derecho de transmisión a una SS o a un determinado grupo de SSs. Dichas concesiones son realizadas después

de que la BS recibe una solicitud del recurso por parte del usuario o grupo antes mencionado.

Para una SS, las peticiones de ancho de banda se realizan con base en solicitudes individuales para cada una de las conexiones (CID) de la estación suscriptora, mientras que la respuesta/concesión a estas peticiones es realizada con base en una SS en particular, no a los CIDs de las conexiones individuales. Es decir, el ancho de banda se asigna al usuario y éste es responsable de distribuir el recurso entre sus conexiones de acuerdo a sus mecanismos de asignación.

En caso de que la respuesta a la petición no cubra completamente las necesidades de ancho de banda, la SS puede decidir llamar al algoritmo exponential backoff y solicitar nuevamente el recurso deseado, o en su defecto, descartar la SDU. Una SS puede hacer uso de los IEs de solicitud enviados por la BS que son del tipo broadcast, dirigidos a un grupo multicast del cual sea miembro, o dirigido específicamente a su CID Básico para realizar una solicitud de ancho de banda. En cualquiera de los casos anteriores, se utiliza el perfil de transmisión indicado en el IE de solicitud enviado por la BS, incluso si la BS es capaz de aceptar un perfil de transmisión más eficiente por parte de la SS. Para poder hacer uso de un perfil de transmisión más eficiente, la SS debe transmitir en un intervalo definido por un IE de concesión de transmisión dirigido específicamente a su CID Básico. Es por esto, que la consulta en unicast a una SS normalmente se realiza enviando un IE de concesión de transmisión dirigido a su CID Básico. Asimismo, se pueden hacer solicitudes de ancho de banda para cualquiera de las conexiones de una SS dentro de los IE de concesiones de transmisión enviados a su CID básico[4].

3.6.3. Consulta (Polling)

Polling es el proceso por el cual la BS asigna un cierto ancho de banda a las SSs con el fin de permitirles realizar solicitudes de ancho de banda. Estas asignaciones de ancho de banda pueden hacerse a SSs individuales o a grupos de SSs. Las asignaciones de ancho de banda a grupos de conexiones y/o SSs definen en realidad lo que se conoce como IEs de contención, los cuales se utilizan para realizar solicitudes de ancho de

banda por parte de las SSs. Dichas asignaciones no tienen la forma de un mensaje explícito, pero están incluidas como una serie de IEs dentro del UL-MAP. El proceso de polling es realizado con base en las SSs y no con base en las conexiones individuales de éstas. Las estaciones suscriptoras siempre solicitan el ancho de banda con base en sus CIDs individuales, mientras que la asignación del recurso por parte de la BS es realizada con base en la SS que solicitó [15].

3.7. WirelessMAN-OFDM PHY

El perfil WirelessMAN-OFDM PHY está basado en la modulación OFDM y diseñado para su operación en NLOS en las bandas de frecuencia inferiores a 11GHz [15].

La descripción de esta sección está basada en el estándar IEEE 802.16-2004 [15], dado que el equipo instrumental que se usará en los próximos capítulos es compatible con esta norma.

3.7.1. Descripción de un símbolo OFDM

3.7.1.1. Dominio de Tiempo

La Transformada Inversa de Fourier crea la forma de la onda OFDM; esta duración de tiempo se refiere a la duración del símbolo útil T_b . Una copia del último T_g del periodo del símbolo útil, denominado Prefijo Cíclico (CP, Cyclic Prefix), es usado para mitigar los efectos del “*multipath*”, mientras mantiene la ortogonalidad de los tonos. La figura 3.4 muestra esta estructura.

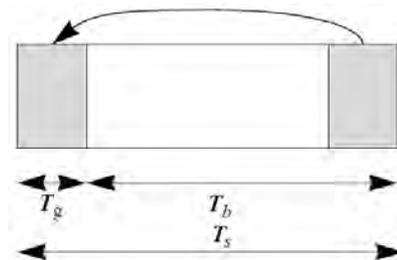


Figura 3.4: Estructura de tiempo de un símbolo OFDM.

3.7.1.2. Dominio de Frecuencia

La descripción del dominio de frecuencia incluye la estructura básica de un símbolo OFDM.

Un símbolo OFDM (ver figura 3.2 se compone de subportadoras, el número de estas determina el tamaño de la FFT usada. Hay 3 tipos de subportadoras (subcarriers):

- Subportadoras de Datos: Para transmisión de datos.
- Subportadoras Piloto: Para propósitos de estimación del canal.
- Subportadoras Nulas: Para ningún tipo de transmisión, para bandas de guarda (guard bands), subportadoras no activas y subportadora central (DC subcarrier).

El propósito de las bandas de guarda es permitir el decaimiento natural de la señal. Las transmisiones subcanalizadas en el uplink son una opción para la SS, deberá ser usada solamente si la señal de la BS es capaz de decodificar tales transmisiones.

3.7.2. Parámetros del símbolo OFDM y de la señal transmitida

3.7.2.1. Definición de los parámetros Primitivos

Cuatro parámetros primitivos caracterizan el símbolo OFDM:

- BW . Este es el Ancho de Banda.
- N_{FFT_D} . Número de subportadoras de datos.
- N_{used} . Número de subportadoras usadas (incluye las subportadoras de datos y las subportadoras piloto).
- n . Factor de muestreo. Este parámetro en conjunto con BW y N_{use} determinan el espacio entre subportadoras y el tiempo de símbolo útil. Los valores de este parámetro de especifican en la tabla 3.2.
- G . Esta es la razón del tiempo del Prefijo Cíclico al tiempo “útil”. Los valores de este parámetro de especifican en la tabla 3.2.

3.7.2.2. Definición de los parámetros Derivados

Los siguientes parámetros son definidos en términos de los parámetros primitivos:

- N_{FFT} : Se refiere al total de subportadoras (incluye las subportadoras de datos, piloto, de guarda y DC). Se calcula como la menor potencia de dos que sea más grande que N_{used} .
- Frecuencia de muestreo: $F_s = \lfloor \frac{n \cdot BW}{8000} \rfloor \cdot 8000$.
- Espacio entre subportadoras: $\Delta f = \frac{F_s}{N_{FFT}}$.
- Tiempo de símbolo útil: $T_b = \frac{1}{\Delta f}$.
- Tiempo del Prefijo Cíclico: $T_g = G \cdot T_b$.
- Tiempo del símbolo OFDM: $T_s = T_b + T_g$.
- Tiempo de muestreo: $\frac{T_b}{N_{FFT}}$.

3.7.2.3. Parámetros de la señal transmitida

Los parámetros de la señal OFDM transmitida, están dados en la tabla 3.2.

Parámetros	Valores
N_{FFT}	256 (incluye subportadoras de datos, piloto, de guarda y DC)
N_{FFT_D}	192
N_{used}	200 (incluye subportadoras de datos y piloto)
n	Para canales cuyo ancho de banda sea múltiplo de 1.75 MHz, entonces $n = 8/7$. Para canales cuyo ancho de banda sea múltiplo de 1.5 MHz, entonces $n = 86/75$. Para canales cuyo ancho de banda sea múltiplo de 1.25 MHz, entonces $n = 144/125$. Para canales cuyo ancho de banda sea múltiplo de 2.75 MHz, entonces $n = 316/275$. Para canales cuyo ancho de banda sea múltiplo de 2 MHz, entonces $n = 57/50$. Para canales cuyo ancho de banda no esté especificado aquí se tomará $n = 8/7$.
G	1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Número de subportadoras piloto	8
Número de subportadoras DC	1
Número de subportadoras de guarda de frecuencia mas baja	28
Número de subportadoras de guarda de frecuencia mas alta	27

Tabla 3.2: Parámetros del símbolo OFDM.

Capítulo 4

Propagación

Con el fin de entender mejor el funcionamiento de los sistemas que operan de manera inalámbrica, es decir, sobre canales de radio, se introduce este capítulo para conocer algunas propiedades del canal de radio.

De igual manera se muestra de manera muy breve algunos modelos de propagación que han ido surgiendo por la necesidad de conocer el comportamiento de estas señales.

Por último, se muestra el modelo de propagación más popular utilizado para saber como se degrada la señal de los sistemas basados en el estándar IEEE 802.16, viendo como ha ido surgiendo y las modificaciones que se le han implementado con el fin de obtener datos cada vez más precisos.

4.1. Propiedades del canal de radio

Sabemos por experiencia que cuando se recibe una señal de radio, el receptor no obtiene la señal exactamente igual a como la transmitió el emisor, lo cual es debido a las propiedades que posee el canal de radio. Algunas de sus propiedades se muestran a continuación:

- Produce pérdidas de potencia.

- Si no se tiene cuidado puede haber distorsión entre las señales.
- Es variante con respecto al tiempo.
- Se producen varios fenómenos físicos como son:
 - Reflexión (Edificios, suelo, paredes, etc.).
 - Difracción.
 - Absorción (lluvia, nieve, árboles, etc.).
 - Efecto Doppler (cuando se está en movimiento).

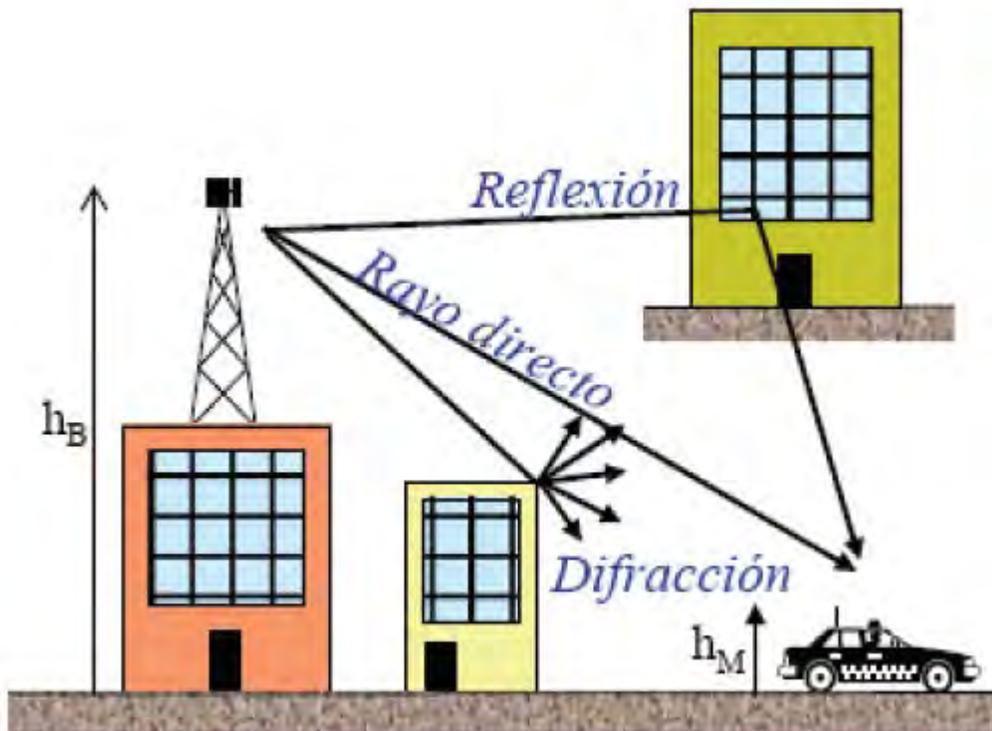


Figura 4.1: Efectos del canal de radio.

4.2. Modelos de propagación para WiMAX

El grupo 802.16 del IEEE, conjuntamente con la Universidad de Stanford, llevó a cabo un extenso trabajo de investigación con el propósito de desarrollar un modelo de canal WiMAX para entornos suburbanos, que aplica a todas las versiones del protocolo IEEE 802.16 (Ver sección 2.3 de la página 34). Uno de los resultados más importantes obtenidos fue el modelo de pérdida de propagación SUI (Stanford University Interim) [10], el cual es una extensión del trabajo previo desarrollado por AT&T Wireless y el análisis del mismo hecho por Erceg et al. [11].

Para calcular la pérdida básica de propagación, el modelo SUI propone agrupar los escenarios de propagación en tres diferentes categorías, cada una con sus características propias:

- Categoría A: terreno montañoso con niveles medios y altos de vegetación, que corresponde a condiciones de pérdidas elevadas.
- Categoría B: terreno montañoso con niveles bajos de vegetación, o zonas llanas con niveles medios y altos de vegetación. Nivel medio de pérdidas.
- Categoría C: zonas llanas con densidad de vegetación muy baja o nula. Corresponde a trayectos donde las pérdidas son bajas.

Para los tres escenarios, las características generales son, típicamente, las siguientes:

- Tamaño de las celdas < 10 km.
- Altura de la antena del receptor: 2 a 10 m.
- Altura de la antena de la estación base: 15 a 40 m.
- Requisito de porcentaje de cobertura elevado (80 %-90 %).

Según la documentación del IEEE 802.16, el modelo SUI es un método de estimación apropiado para sistemas WiMAX y BFWA (Broadband Fixed Wireless Applications).

A continuación se describe el modelo SUI y algunas variaciones del mismo que añaden factores de corrección.

4.2.1. Modelo SUI básico o Modelo ERCEG

El modelo SUI básico propuesto por el IEEE, está basado en el modelo de Erceg [11] para frecuencias cercanas a 2 GHz, altura de antena receptora menor a 2 m, y debe aplicarse a entornos suburbanos, como se explica a continuación.

En el mismo se define la siguiente expresión para la pérdida básica de propagación:

$$PL(dB) = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + s; \quad d > d_o \quad (4.1)$$

Donde $d_o = 100m$ y d es la distancia entre la BS y el receptor en metros.

Además A , γ y s se caracterizan de la siguiente manera.

A es una cantidad fija dada por la formula de la pérdida por trayectoria en espacio libre.

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d_o}{\lambda} \right) \quad (4.2)$$

Donde λ es la longitud de onda en metros.

γ es el exponente de pérdida por trayectoria, dada como una variable aleatoria Gaussiana sobre el conjunto de macro-células dentro de cada categoría de terreno. Queda escrita de la siguiente manera:

$$\gamma = \left(a - b \cdot h_{bs} + \frac{c}{h_{bs}} \right) + x \cdot \sigma_\gamma \quad (4.3)$$

Donde:

a, b, c, σ_γ : son constantes que dependen de la categoría del terreno, ver tabla 4.1.

h_{bs} : es la altura de la antena de la BS en metros dentro del rango 10m-80m.

σ_γ : es la desviación estándar de γ .

x : es la variable aleatoria Gaussiana con media cero y desviación estándar uno $N[0,1]$.

s es la componente de desvanecimiento de sombra y varía aleatoriamente de la ubicación de una terminal a otra en el interior de cualquier macro-célula dada. s es una

Parámetros de los modelos	Terreno Categoría A	Terreno Categoría B	Terreno Categoría C
a	4.6	4.0	3.6
b (m^{-1})	0.0075	0.0065	0.0050
c (m)	12.6	17.1	20.0
σ_γ	0.57	0.75	0.59
μ_σ	10.6	9.6	8.2
σ_σ	2.3	3.0	1.6

Tabla 4.1: Parámetros utilizados para los modelos ERCEG.

variable aleatoria Gaussiana con media cero y por eso puede ser escrita como:

$$s = y \cdot \sigma \quad (4.4)$$

Donde y es una variable aleatoria Gaussiana con media cero y desviación estándar uno $N[0,1]$; y σ es la desviación estándar de s , ella misma es una variable aleatoria Gaussiana sobre el conjunto de macro-células dentro de cada categoría de terreno. Por eso σ puede ser escrita como:

$$\sigma = \mu_\sigma + z \cdot \sigma_\sigma \quad (4.5)$$

Donde μ_σ es la media de σ ; y σ_σ es la desviación estándar de σ ; z es una variable aleatoria Gaussiana con media cero y desviación estándar uno $N[0,1]$. Tanto μ_σ como σ_σ son constantes derivadas de los datos experimentales para cada categoría de terreno. Los valores de μ_σ y σ_σ se encuentran en la tabla 4.1.

4.2.2. Modelo ERCEG con factor de corrección de frecuencia

Para frecuencias mayores a 2 GHz y contemplando la altura de antena receptora (h_{ss}) entre 2 y 10 m, se introducen factores de corrección en el 2003 al modelo básico

previamente estudiado.

$$PL = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + s + C_f + C_h; \quad d > d_o \quad (4.6)$$

$$C_f = 6 \cdot \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (4.7)$$

$$C_h = \begin{cases} -10.8 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_{ss}}{2} \right); & \text{para Cat. A y Cat. B} \\ -20 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_{ss}}{2} \right); & \text{para Cat. C} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$(4.9)$$

Donde:

C_f : es el factor de corrección de frecuencia.

f : es la frecuencia de operación en MHz.

C_h : es el factor de corrección de altura de la antena receptora.

h_{ss} : representa la altura de la antena receptora, válida entre 2-10m.

Esta versión del modelo ERCEG, que incluye factores de corrección, es la que es mayormente empleada en cálculos de propagación con este modelo.

4.2.3. Reducción del modelo ERCEG con corrección de frecuencia al caso uncelular

Para el caso en que se trabaje con una sola célula, se puede hacer una reducción a las fórmulas del modelo ERCEG con corrección de frecuencia, de manera que los cálculos que se requieran hacer sean más fáciles. Para hacer esta reducción debemos considerar [9]:

- Se consideran cero las variables aleatorias x , z ya que estas son las que representan la variación de célula a célula en el modelo completo. Con $x = 0$, lo que hacemos es no considerar la variación que existe en la pendiente de la curva de una celula a otra ya que las mediciones serán realizadas en una sola célula. Con $z = 0$, lo que hacemos es despreciar la variación que existe en la

desviación estándar del desvanecimiento de sombra de una célula a otra ya que las mediciones serán realizadas en una sola célula.

- Se considera una variable aleatoria y , con esto se está considerando el valor esperado de la desviación estándar del desvanecimiento de sombra dentro de una célula, es decir $\mu_\sigma = \sigma$, este valor esperado o esperanza matemática de la desviación estándar del desvanecimiento de sombra corresponde a un valor constante en dB para cada categoría de terreno y se debe sumar a las pérdidas por trayectoria porque representa la contribución en la atenuación de la señal debido al fenómeno de desvanecimiento de sombra.

Con base en estas consideraciones tenemos:

Exponente de pérdida por trayectorias

$$\gamma = \left(a - b \cdot h_{bs} + \frac{c}{h_{bs}} \right); \quad 10m < h_{bs} < 80m \quad (4.10)$$

Desvanecimiento de sombra

$$s = \sigma = \mu_\sigma \quad (4.11)$$

4.2.4. Modelo SUI extendido

El modelo SUI modificado [27] propuesto por el IEEE 802.16 modifica el factor de corrección C_h en función de los propuestos por Okumura. Esta modificación supone un recálculo de la distancia de referencia d_o que asume ahora el valor d'_o dado. Se definen así las siguientes expresiones para el cálculo de la pérdida básica de propagación:

$$PL = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) & d \leq d'_o \\ A + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + C_f + C'_h; & d > d'_o \end{cases} \quad (4.12)$$

Donde:

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d'_o}{\lambda} \right)$$

$$d'_o = d_o \cdot 10^{-\left(\frac{C_f + C'_h}{10 \cdot \gamma}\right)}$$

$$\gamma = a - b \cdot h_{bs} + \frac{c}{h_{bs}}$$

C'_h es el nuevo factor de corrección de la altura de la antena del receptor:

$$C'_h = \begin{cases} -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_{ss}}{3} \right); & \text{para } h \leq 3m \\ -20 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_{ss}}{3} \right); & \text{para } h > 3m \end{cases} \quad (4.13)$$

Los parámetros a , b , c y d_o del modelo, son aquellos definidos en el apartado anterior.

4.3. Ecuaciones adicionales

El siguiente conjunto de ecuaciones adicionales permiten relacionar y calcular la pérdida por trayectoria, la potencia recibida y la relación señal a ruido. Cabe mencionar que obteniendo mediante mediciones uno de estos tres parámetros se pueden calcular fácilmente los otros dos despejando del conjunto de ecuaciones adicionales que se muestra a continuación.

La Potencia en el Receptor está dada por:

$$Prx[dB] = PIRE[dB] + Grx[dBi] - PL[dB] \quad (4.14)$$

- PL[dB] : Pérdida por trayectoria calculada.
- Grx[dBi]: Ganancia de la antena receptora.
- PIRE[dB] : Potencia Isotrópica Radiada Efectiva.

La Potencia Isotrópica Radiada Efectiva esta dada por:

$$PIRE[dB] = Ptx[dB] + Gtx[dBi] - Lc[dB] \quad (4.15)$$

- P_{tx} [dB] : Potencia transmitida.
- G_{tx} [dBi] : Ganancia de la antena transmisora.
- L_c [dB] : Pérdidas por cables y conectores.

La Relación Señal a Ruido está dada por:

$$SNR[dB] = P_{rx}[dB] - N[dB] \quad (4.16)$$

El ruido térmico es la suma del ruido ambiente más la figura de ruido del receptor:

$$N[dB] = [10 \cdot \log_{10}(T \cdot BW \cdot K_o)] + N_f[dB] \quad (4.17)$$

- T : Temperatura ambiente promedio en grados kelvin, típicamente 293°k.
- BW : Ancho de banda en MHz para el canal WIMAX.
- N_f [dB] : Figura de ruido en el receptor, dado por especificaciones del fabricante en dB.

Capítulo 5

Descripción del equipo instrumental

En este capítulo se describe de manera general la estructura física de las redes WiMAX, indicando los equipos necesarios para este tipo de redes.

Se da una breve descripción de los equipos WiMAX, explicando cómo se instalan, cómo están conectados entre sí y su funcionalidad.

Se describe el proceso de configuración de las Estaciones Base y Suscriptor WiMAX utilizadas, dado que algunos parámetros deben coincidir tanto en la Estación Base como en el Suscriptor para que puedan establecer un enlace entre ellos.

Se muestra una manera de realizar el proceso de registro de un suscriptor y una PC en la Estación Base para poder asignarle un ancho de banda y una QoS a los enlaces de datos UpLink y DownLink.

Se describe la estructura del escenario de la ubicación física real de cada uno de los equipos utilizados.

Por último, se describe la forma en que se hizo la recolección de cada uno de los datos de las mediciones con sus coordenadas.

5.1. Estructura física de una red WiMAX

Una red WiMAX consiste principalmente de dos partes:

- Una Estación Base.
- Una Estación Suscriptora.

El esquema de la estructura física usada para el desarrollo de esta tesis se muestra en la figura 5.1. En este esquema se muestra como se conecta una Estación Suscriptora (receptor de señales WiMAX) con una Estación Base (emisor de señales WiMAX), de igual manera se muestra cómo y dónde conectar los equipos de cómputo necesarios (para esta tesis, las laptops utilizadas para el enlace y recolección de datos).

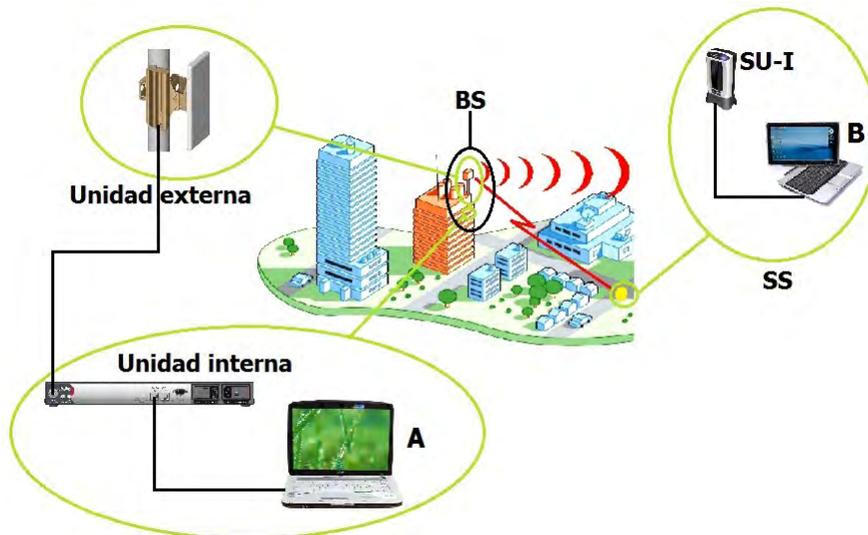


Figura 5.1: Estructura física básica de una red WiMAX.

En esta estructura se tiene una laptop A, una laptop B, una Estación Base (BS) y una Estación Suscriptora (SS), donde la Estación Base está comprendida de una unidad interna y una unidad externa y la Estación Suscriptora de una Unidad Suscriptora para Interiores (SU-I).

5.2. Descripción de los equipos WiMAX

A continuación se da una breve descripción de los equipos WiMAX representados en la figura 5.1.

5.2.1. Descripción de la BS

La Estación Base utilizada para la realización de esta tesis es un equipo RedMAX AN-100U, consiste de una unidad interna y un modem externo con una antena sectorial de 120°, opera en el rango de 3.4 a 3.8 GHz, cumple con la certificación del Foro WiMAX, fabricado por la compañía Redline Communications, líder mundial en el diseño y producción de sistemas inalámbricos fijos de banda ancha. [25]

Opera con base en el Estándar IEEE 802.16-2004, el cual describe la implementación de sistemas PTP y PMP, cumpliendo a la vez con los siguientes perfiles de capa física WirelessMAN-OFDM y WirelessHUMAN-OFDM:

- Perfil WirelessMAN-OFDM PHY con canalización de 3.5 MHz.
- Perfil WirelessMAN-OFDM PHY con canalización de 7 MHz.



Figura 5.2: Estación Base.

5.2.1.1. Descripción física de la Unidad Interna de la Estación Base

Esta Unidad Interna de la Estación Base puede ser colocada sobre una superficie plana o bien puede montarse en un rack. El puerto de Administración sirve para poder conectarse de manera directa al equipo y poder modificar las configuraciones deseadas. Los puertos de sincronización no se ocupan para el desarrollo de esta tesis puesto que sirven para conectar otros equipos iguales para poder tener un área de cobertura circunferencial más amplia y que puedan estos equipos sincronizarse para no interferir unos con otros. El puerto IF provee una conexión mediante cable coaxial con el modem para poder sincronizarse, mandar datos y energizar la radio.



Figura 5.3: Características del panel frontal.

5.2.1.2. Descripción física de la Unidad Externa de la Estación Base

El radio modem se encuentra ubicado en una caja de aleación de aluminio a prueba de agua, tiene un puerto IF para conectarse con la terminal por medio de un cable coaxial para poder enviar y recibir datos de y hacia la terminal, de igual forma le sirve como suministro de energía. Dicho modem también posee un puerto RF por el cual se conecta con la antena mediante un cable coaxial corto, utilizado para poder enviar y recibir la señal de radio frecuencia (RF) de y hacia la antena.



Figura 5.4: Modem y antena.

5.2.2. Descripción de la SS

La Estación Suscriptor utilizada para esta tesis es un equipo RedMAX SU-I, opera en el rango de 3.3 a 3.5 GHz, cumple con la certificación del Foro WiMAX, fabricado por la compañía Redline Communications, líder mundial en la producción y diseño de sistemas inalámbricos fijos de banda ancha [26]. Cada suscriptor se registra y establece un enlace de datos bi-direccional con la Estación Base.

Opera con base en el Estándar IEEE 802.16-2004, cumpliendo con la implementación de los sistemas PMP.



Figura 5.5: Unidad Suscriptor para Interiores.

5.2.2.1. Descripción física del SU-I

El Suscriptor es una unidad totalmente integrada con una antena interna, que además incluye:

- Adaptador AC para el suministro de energía.
- Soporte de escritorio.
- Soporte de montaje universal.



Figura 5.6: Características de la Unidad Suscriptora para Interiores.

5.3. Configuración de los equipos

5.3.1. Configuración de la BS

El equipo WIMAX RedMAX AN-100U cuenta con una interfaz gráfica, lo cual hace que las configuraciones puedan manejarse de una manera más fácil. Para poder acceder a esta interfaz, lo primero que se tiene que hacer es configurar la red Ethernet

de la laptop A (ver figura 5.1) en el mismo segmento de red que la BS; para el desarrollo de esta tesis la BS se encontraba previamente configurada, ya que es usada por más usuarios.

Así se tiene que la dirección IP de la BS es 192.168.182.3 y para poder acceder se debe de asignarle a la laptop A la dirección 192.168.182.X, donde X debe ser distinto de 3, en este caso se han asignado los siguientes parámetros:

- Dirección IP: 192.168.182.50
- Máscara de subred: 255.255.255.0
- Puerta de enlace predeterminada: 192.168.182.3

Una vez hecho esto se debe de conectar la laptop por medio de un cable Ethernet directo al puerto de datos que se muestra en la figura 5.3, luego se debe acceder mediante algún navegador de internet de la laptop a la dirección IP de la BS y a continuación aparecerá un recuadro pidiendo un nombre de usuario y una contraseña, lo cuales para esta BS son *admin* ambos. Si se ha hecho todo de manera correcta, aparecerá una pantalla igual a la que se muestra en la figura 5.7.



Figura 5.7: Información General de la BS.

Ahora se debe de obtener los parámetros que tiene definidos la BS para poder configurar después la SS con los mismos datos y que puedan ambos equipos crear un enlace de datos bi-direccional. Para esto se accede a la opción *Wireless Interface* ubicado en la parte izquierda del menú principal como se muestra en la figura 5.8.

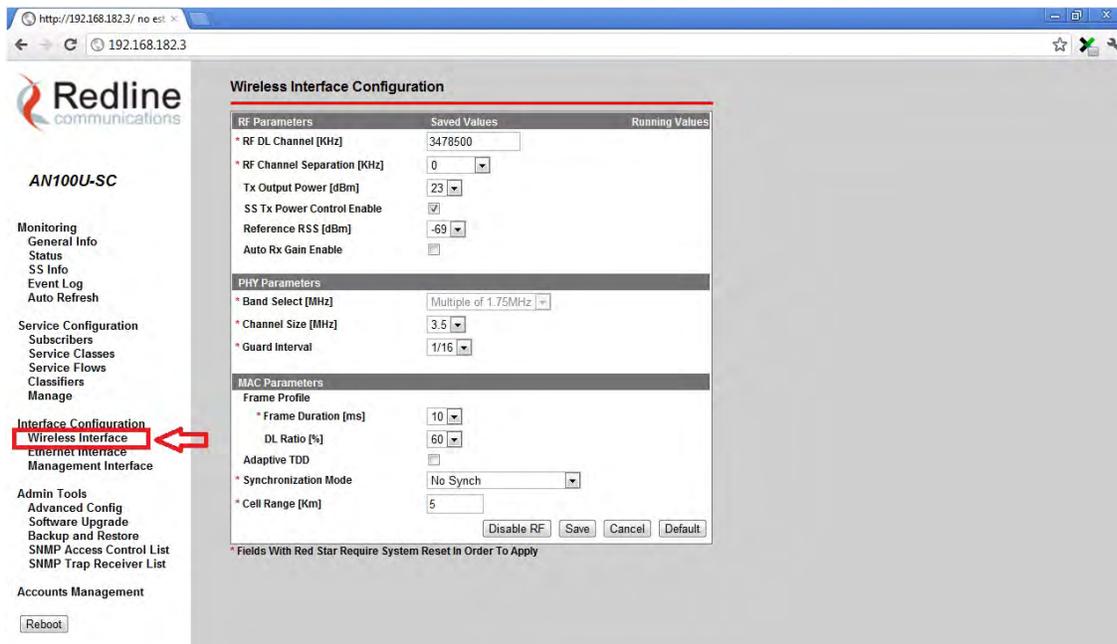


Figura 5.8: Configuración de la Interfaz Inalámbrica.

Anotamos los siguientes datos:

- Canal: 3,478,500 KHz.
- Tamaño del canal: 3.5 MHz.
- Intervalo de Guarda: 1/16.

Nota: se debe de tomar en cuenta que esta BS estaba previamente configurada, pues de lo contrario algunos pasos deberían de ser cambiados, pero podría configurarse guiándose del manual de la BS[25].

5.3.2. Configuración del SU-I

El equipo Suscriptor utilizado no posee una Interfaz Gráfica como la BS, sin embargo puede configurarse por medio de una conexión **Telnet**. Se tiene que el SU-I posee dos direcciones IP[26]:

- Fija: 192.168.101.1 (no puede ser modificada)
- Predeterminada: 192.168.101.2 (puede ser modificada)

A continuación lo que hace es asignarle a la red Ethernet de la laptop B (ver figura 5.1) la dirección 192.168.101.X, donde X debe ser distinta de 1 y 2, para este caso han asignado los siguientes parámetros:

- Dirección IP: 192.168.101.51
- Máscara de subred: 255.255.255.0
- Puerta de enlace predeterminada: 192.168.101.1

Una vez hecho esto se debe de conectar la laptop B por medio de un cable Ethernet directo al puerto de datos que se muestra en la figura 5.6, luego se debe de abrir la consola de comandos (de windows en la laptop usada) y se escribe *telnet 192.168.101.1* (enter), luego la consola de comandos pedirá un nombre de usuario y una contraseña, para lo cual se debe escribir *admin* en ambos casos; a continuación se da la instrucción *ipAddress* y se modifican los siguientes parámetros:

- Dirección IP: *set Address 192.168.182.25*.
- Máscara de subred: *set Mask 255.255.255.0*.

Luego se da la instrucción *exit* para poder salir de las configuraciones de los comandos de direcciones IP. Ahora se da la instrucción *phyConfig* y se modifican los siguientes parámetros:

- Tamaño del canal: *set Bandwidth 3500*.
- Intervalo de guarda: *set CyclicPrefix 16*.

Luego se da la instrucción *exit* para poder salir de las configuraciones de la capa física. Ahora se da la instrucción *rfConfig* y se modifican los siguientes parámetros:

- Límite superior del escaneo de frecuencias: *set HiRfFreq1 3478500*.
- Límite inferior del escaneo de frecuencias: *set LoRfFreq1 3478500*.

Ahora se sale de la conexión Telnet y se procede a cambiar de nuevo la configuración de red Ethernet de la laptop B para que quede en el mismo segmento de red que el SU-I y la BS, quedando de la siguiente manera:

- Dirección IP: 192.168.182.51
- Máscara de subred: 255.255.255.0
- Puerta de enlace predeterminada: 192.168.182.25

Con esto se terminan todas las configuraciones necesarias para poder establecer una comunicación entre el SU-I y la BS. Cabe mencionar que estas configuraciones se encuentran en el manual del usuario del SU-I [26].

5.4. Configuración de los enlaces de datos

Ahora que ya se ha configurado el SU-I y la BS para que puedan reconocerse entre ellos, solo queda realizar el registro del SU-I en la BS para poder asignarle un ancho de banda y una calidad de servicio a los canales *Downlink* y *Uplink*.

Lo primero que se tiene que hacer es encender todos los equipos y colocar el SU-I dentro del área de cobertura de la BS. Luego hay que acceder a las configuraciones de la BS en su Interfaz Gráfica, explicado en la sección 5.3.1 en la página 68, luego para estar seguros de que el SU-I y la BS se reconocen, se accede al menú *SS Info* de la parte izquierda y se verá en la ventana principal algunos datos, dentro de los cuales aparecerá la MAC de nuestro SU-I, tal y como puede apreciarse en la figura 5.9.

Si se logra ver una pantalla similar a la mostrada en la figura 5.9, se procede con el registro del SU-I en la BS, de lo contrario se debe de checar nuevamente que las configuraciones anteriores coincidan en el SU-I y en la BS.

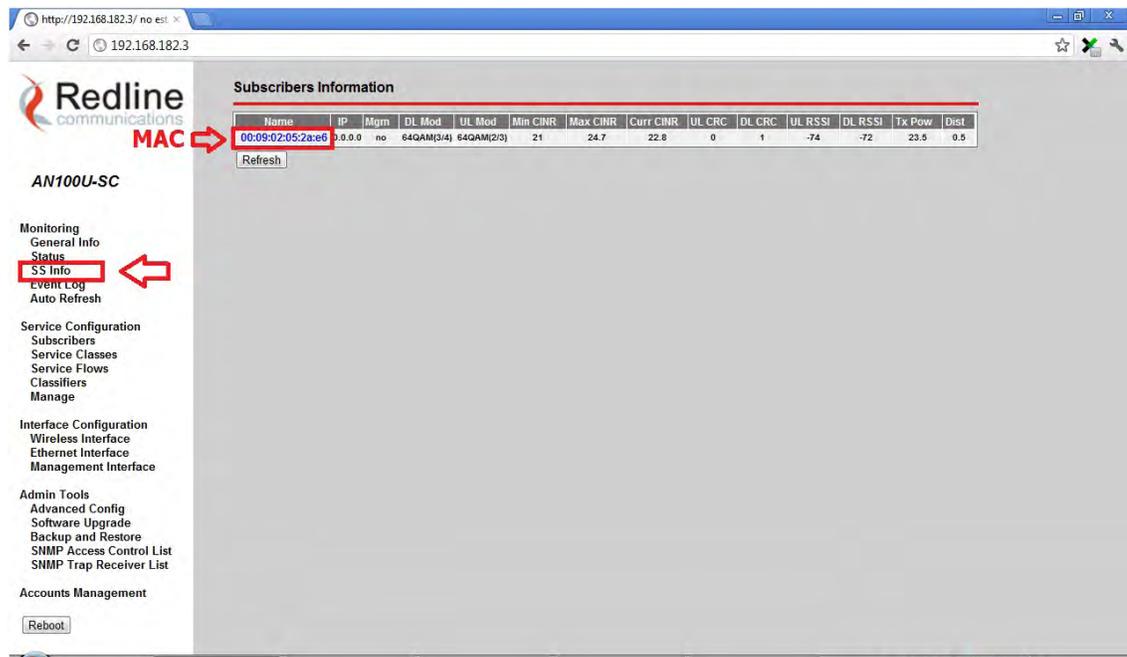


Figura 5.9: Reconocimiento del SU-I en la BS.

5.4.1. Registro del SU-I

Se necesita la dirección MAC del SU-I para poder hacer el registro en la BS, la cual la obtiene automáticamente la BS cuando detecta el SU-I como se puede ver en la figura 5.9. Luego procedemos con los siguientes pasos para hacer el registro del SU-I:

1. Dar clic en el menú izquierdo en *Suscribers*.
2. Copiar la dirección MAC del SU-I en la casilla "Subscriber MAC".
3. Asignar un nombre al SU-I en la casilla "Subscriber Name".
4. Asignar el número máximo de equipos que se conectarán al SU-I en la casilla "Max Host Number".
5. Dar clic en el botón "Add".

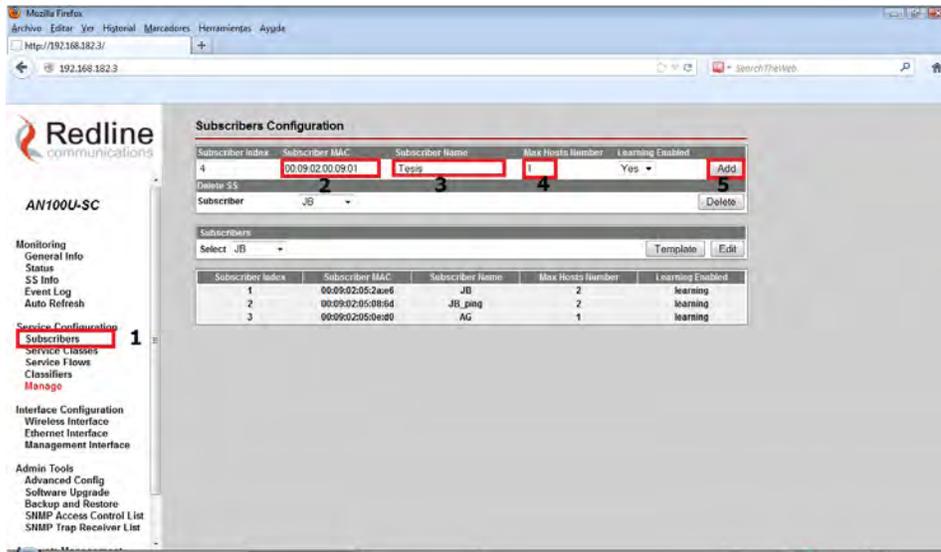


Figura 5.10: Proceso de registro del SU-I.

Ahora los datos que se han ingresado aparecen como se muestra en el marco rojo (marco 6) en la figura 5.11 y solamente falta guardar las configuraciones hechas, para ello se debe de dar clic en las letras en rojo (marco 7) que se muestran en la misma figura 5.11.

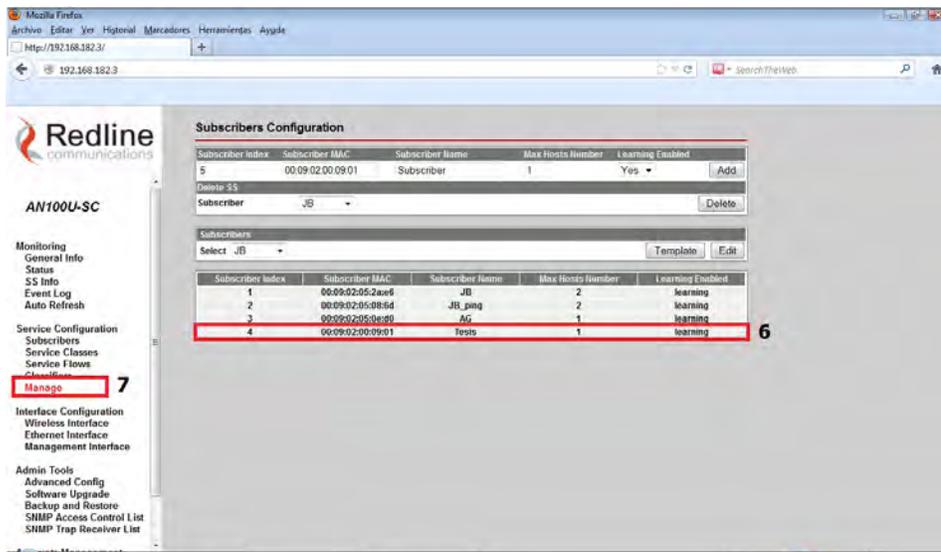


Figura 5.11: Registro del SU-I terminado.

A continuación se ve una imagen tal como se muestra en la figura 5.12 y se da clic en el botón *save* que se encuentra enmarcado en rojo (marco 8) para visualizarlo mejor.

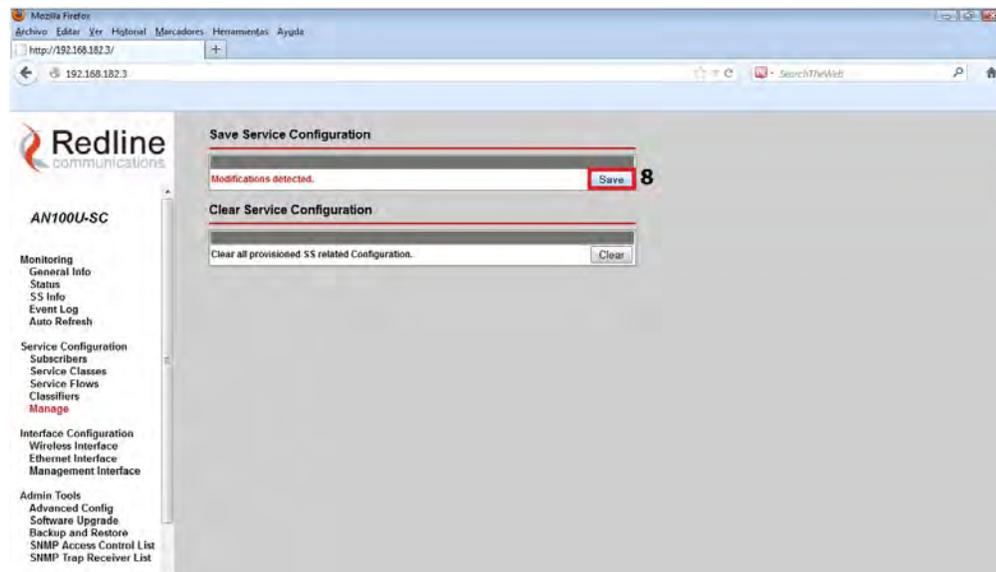


Figura 5.12: Proceso de guardado de configuraciones.

Ya se ha realizado el proceso de registro y se han guardado estas configuraciones, ahora si se da clic en el menú “*SS Info*” como se muestra en la figura 5.9 en lugar de ver la dirección MAC del SU-I, se verá el nombre asignado.

5.4.2. Creación de la Clase de Servicio

Para los pasos siguientes se requiere estar conectado a la Interfaz Gráfica de la BS. Para crear la Clase de Servicio fue necesario seguir los siguientes pasos:

1. Dar clic en *Service Classes* ubicado en el menú izquierdo.
2. Asignar un nombre en la casilla “Service Class Name”.
3. Asignar el ancho de banda deseado en la casilla “Max. Sustained Rate”.
4. Asignar el tipo de reservación que usará en la casilla “Scheduling Type”.
5. Dar clic en el botón “Add”.

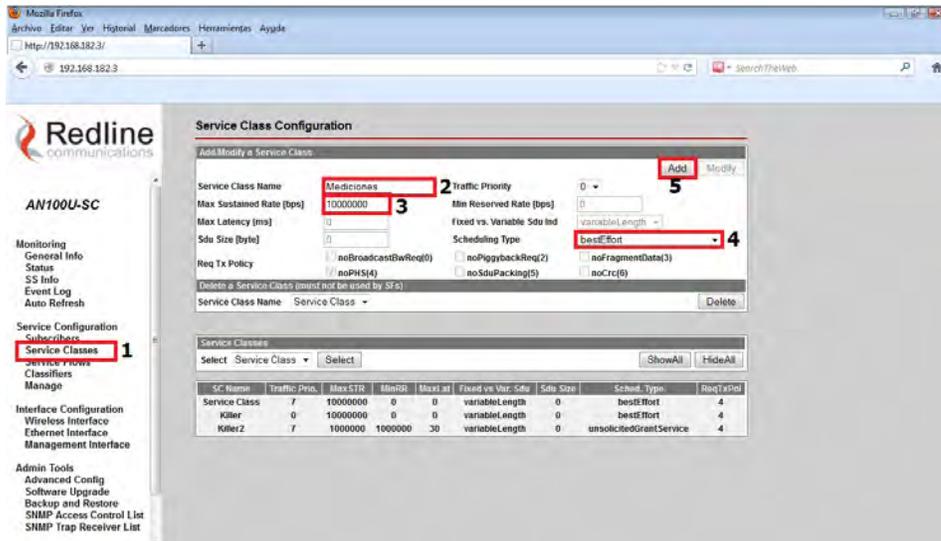


Figura 5.13: Creación de la Clase de Servicio.

Una vez hecho esto, las configuraciones realizadas aparecen en la parte baja de la pantalla, tal como se muestra enmarcado en rojo (marco 6) en la figura 5.14.

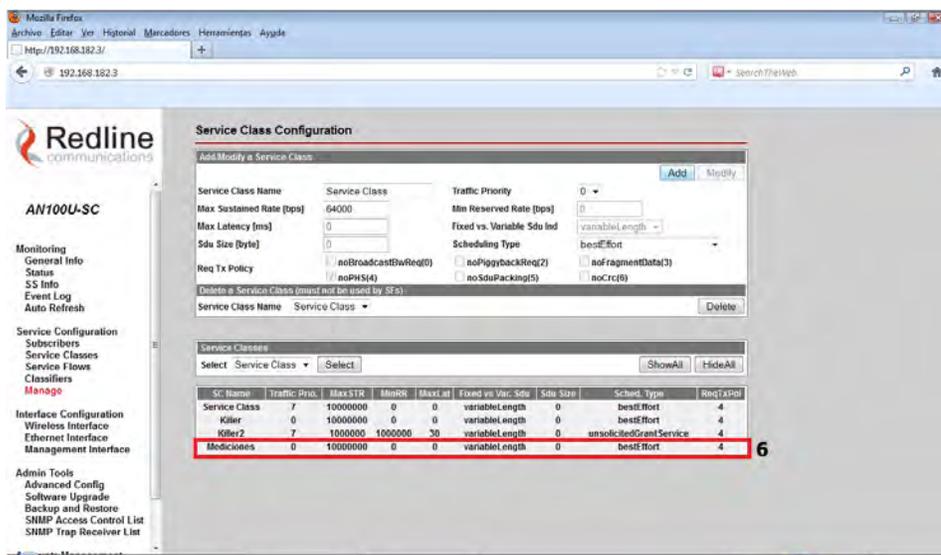


Figura 5.14: Clases de Servicio.

Ahora se procede a guardar nuevamente las configuraciones hechas; tal como se indica al final de la sección 5.4.1 en la página 75.

5.4.3. Creación de los Flujos de Servicio

Para los pasos siguientes es necesario haber creado una clase de servicio y que además se siga conectado a la Interfaz Gráfica de la BS. Para crear los Servicios de Flujo es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Dar clic en **Service Flow** ubicado en el menú izquierdo.
2. Elegir el nombre con el que registramos nuestro SU-I en la casilla “SS Name”.
3. Escoger la dirección del enlace en la casilla “Direction”.
4. Escoger el nombre de nuestra Clase de Servicio Creada en la casilla “SC Name”.
5. Dar clic en el botón “Add”.

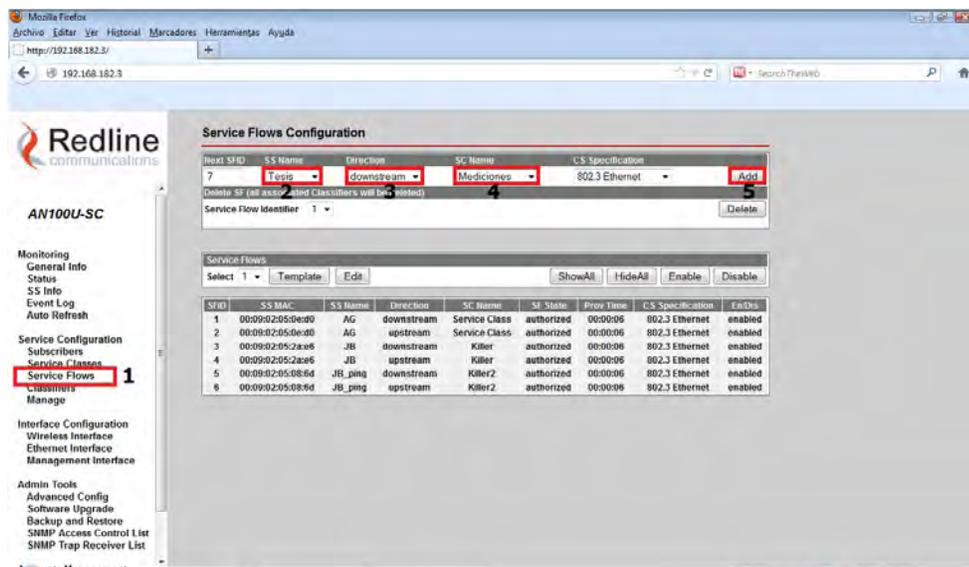


Figura 5.15: Creación de los Flujos de Servicio.

Los pasos anteriores deberán hacerse 2 veces, tomando en cuenta que en el paso 3 hay que crear un Flujo de Servicio por cada dirección del enlace (Downstream y Upstream).

Una vez hecho esto, las configuraciones realizadas aparecen en la parte baja de la pantalla, tal como se muestra enmarcado en rojo (marco 6) en la figura 5.16.

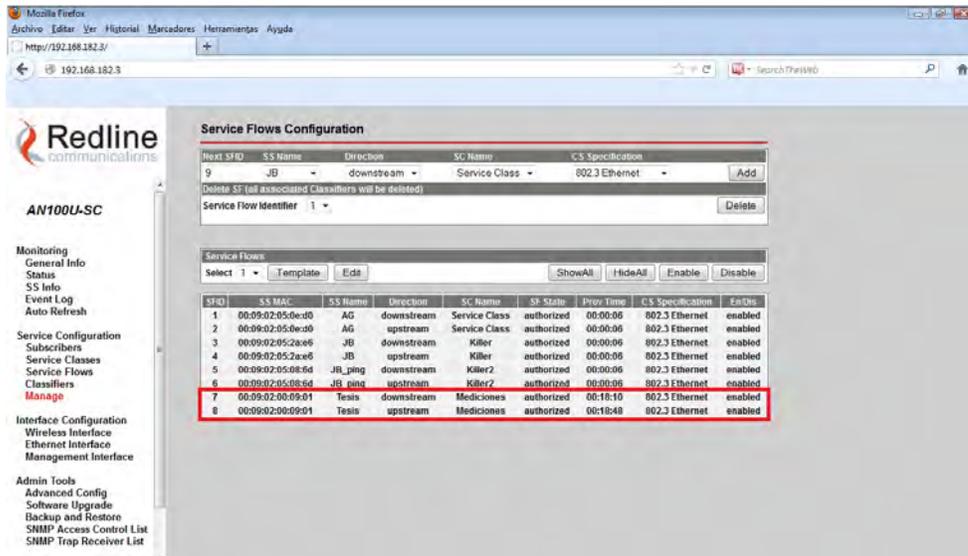


Figura 5.16: Flujos de Servicio.

Ahora se procede a guardar nuevamente las configuraciones hechas; tal como se indica al final de la sección 5.4.1 en la página 75.

5.4.4. Creación de los clasificadores

Para los pasos siguientes es necesario haber creado los flujos de servicio para el downstream y upstream y que además se siga conectado a la Interfaz Gráfica de la BS. Para crear los Clasificadores es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Dar clic en **Classifiers** ubicado en el menú izquierdo.
2. Elegir el número asignado al Flujo de Servicio que creamos para el enlace Downstream o Upstream.
3. Si el paso anterior se refiere a la dirección de enlace Downstream, seleccionar la casilla “DestMacAddr”, de lo contrario seleccionar la casilla “SourceMacAddr” y para ambos casos escribimos la dirección MAC de la laptop B (que se conecta al SU-I, ver figura 5.1).
4. Dar clic en el botón “Add”.

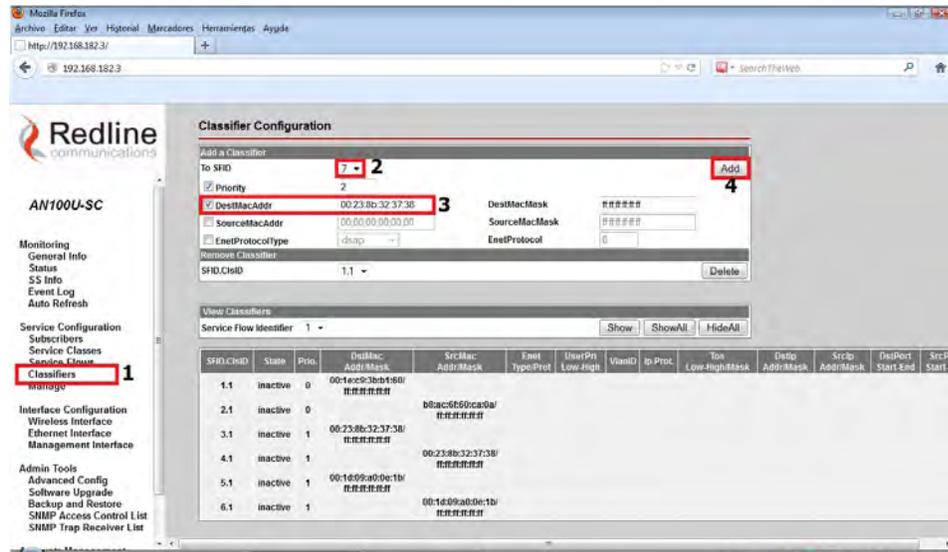


Figura 5.17: Creación de los Clasificadores.

Una vez hecho esto, las configuraciones realizadas aparecen en la parte baja de la pantalla, tal como se muestra enmarcado en rojo (marco 5) en la figura 5.18.

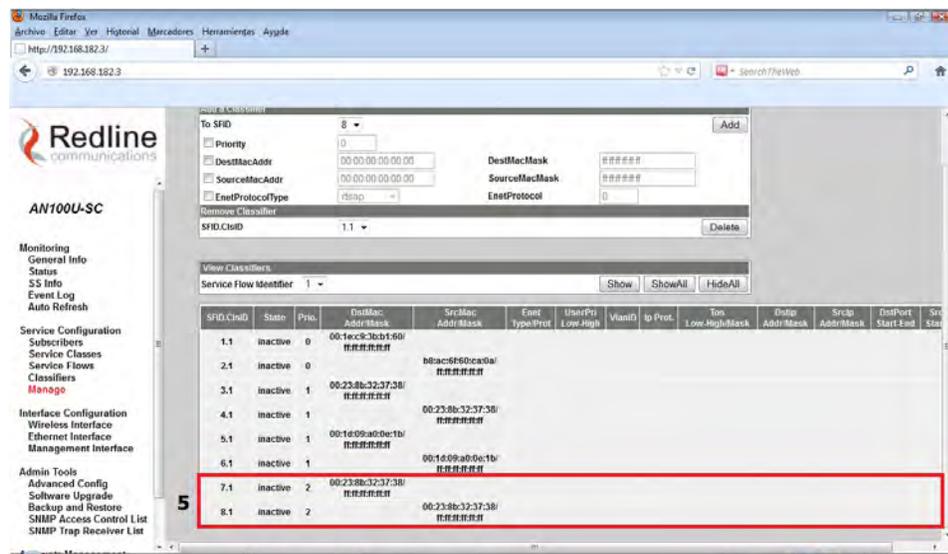


Figura 5.18: Clasificadores.

Ahora se procede a guardar nuevamente las configuraciones hechas; tal como se indica al final de la sección 5.4.1 en la página 75.

5.5. Implementación del escenario

La unidad interna WIMAX RedMAX AN-100U se encuentra instalada en un rack dentro del laboratorio de señales inalámbricas ubicado en el tercer piso del Anexo de Ingeniería en el departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones, tal como se muestra en la figura 5.19, en la cual se puede ver de igual manera la forma en que se conectó la laptop A a dicha unidad para poder monitorear los parámetros que se necesitaron.

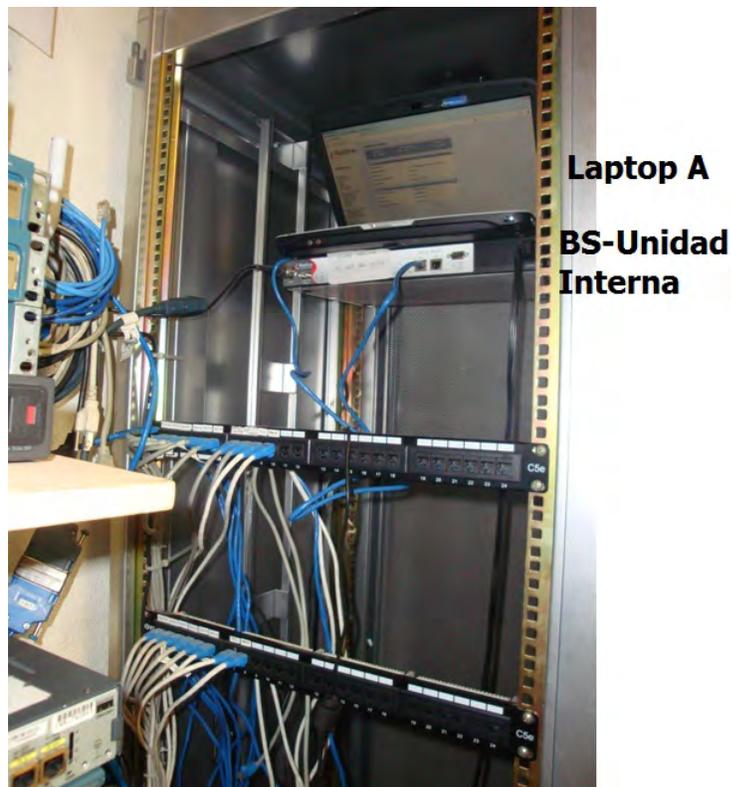


Figura 5.19: Unidad interna de la BS WiMAX.

La unidad externa WIMAX RedMAX AN-100U, se encuentra instalada en una torre arriostrada ubicada en la azotea del mismo edificio, tal como se muestra en la figura 5.20, la cual como puede observarse consta primordialmente de una antena sectorial (manda señal en un sector de 120°).



Figura 5.20: Unidad externa de la BS WiMAX.

La unidad interna y la unidad externa de la BS WiMAX están conectadas por medio de un cable coaxial RG-58, de igual manera se conectaron a tierra las conexiones y equipos que así lo requerían.

La SS se colocó en diferentes lugares, siempre tomando en cuenta que estuviera dentro del rango de cobertura que da la antena sectorial; además la SS se colocó de 2 maneras diferentes para tomar mediciones.

- La SS se colocó dentro de una camioneta, la cual tenía conectada un inversor de voltaje de 400 Watts. El inversor de voltaje se utilizó para poder conectar la SS y la laptop a una corriente continua de 110 volts. La manera descrita se muestra en la figura 5.21.
- La SS se colocó sobre unos tubos, los cuales a la vez fueron colocados en un diablito que cargaba un no-break de 400 Watts con respaldo de 1 hora y media aproximadamente. El no-break se utilizó para poder conectar la SS y la laptop sin importar el lugar donde se estuviera, siempre y cuando éste tuviera aún carga. La manera descrita se muestra en la figura 5.22.



Figura 5.21: SS conectada usando un inversor de voltaje.



Figura 5.22: SS conectada usando un No-Break.

5.6. Recolección de Datos de campo

Para este proceso ya se tiene funcionando nuestra red WiMAX, por lo que se procede a la toma de medición de datos. Como se mostró en la sección anterior, los datos se toman de 2 maneras diferentes en distintos lugares, teniendo en cuenta que el SU-I se encuentre dentro del área de cobertura de la BS.

Sin importar la manera en que se hayan tomado las mediciones, el proceso de recolección de datos es el mismo, es decir, se posiciona el SU-I en un punto dentro del área de cobertura de la BS, posteriormente mediante la computadora conectada al SU-I se monitorea el SNR que nos marca el SU-I y mediante la computadora conectada a la BS se monitorea otros parámetros como son el RSSI de los canales Downlink y Uplink; esto lo hacemos 5 veces por cada punto donde se tomen mediciones para poder obtener un promedio, puesto que puede ocurrir alguna variación en la medición conforme al momento en que se realizó, por último se marca la posición física en un mapa con ayuda de la aplicación “Google Earth”. Una vez terminado de tomar las cinco mediciones en ambas computadoras y de marcar la posición en el mapa, se procede a moverse a un punto diferente y a hacer todo de nuevo.

Capítulo 6

Comportamiento Dinámico

Para poder realizar investigaciones para mejorar el estándar IEEE 802.16 es necesario conocer algunos de los valores que nos arroja el comportamiento dinámico de este estándar. De esta manera sabemos cuales son las limitaciones del estándar.

En este capítulo calcularemos el *throughput* teórico que puede alcanzar nuestros Equipos WiMAX, tomando en cuenta los valores usados durante las mediciones.

Además con los datos obtenidos de manera experimental podemos saber el *throughput* teórico que se alcanza dependiendo del SNR y la modulación que se tuvo en cada punto.

6.1. Cálculo teórico del throughput

6.1.1. Descripción de un frame OFDM

Un frame OFDM se puede ver como una matriz igual a la figura 6.1, donde el eje horizontal representa el tiempo (donde se alojan los símbolos) y el eje vertical representa la frecuencia (donde se alojan las subportadoras). Para poder conocer el *throughput* teórico es necesario conocer primero el número de símbolos y el número de subpor-

tadoras que transmiten datos, puesto que algunos de los símbolos y subportadoras del frame se utilizan para transmitir información de control.

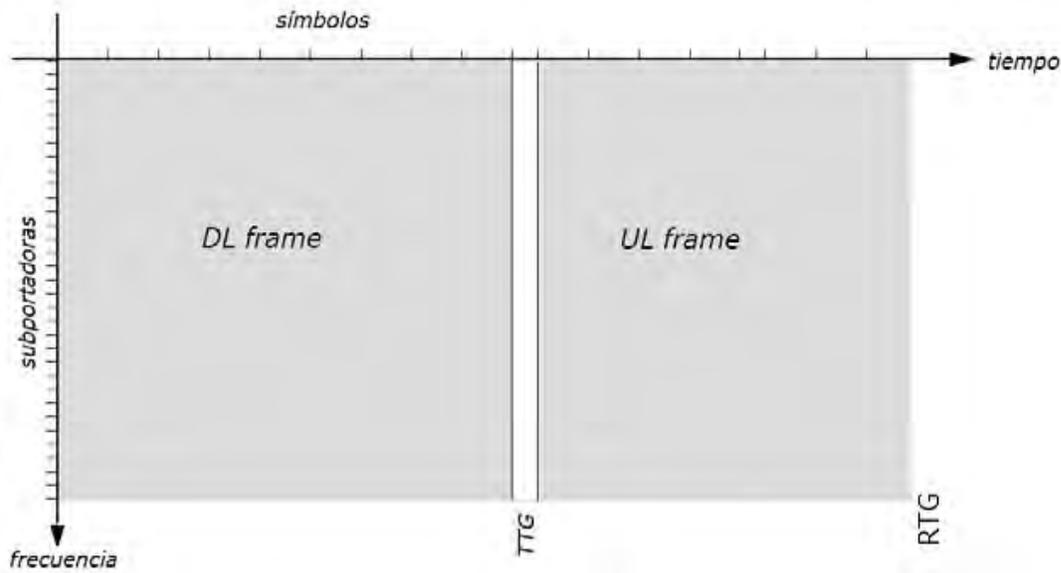


Figura 6.1: Frame OFDM.

La figura 6.2 muestra el detalle de los campos incluidos en el subframe DL y la figura 6.3 muestra el detalle de los campos incluidos en el subframe UL.

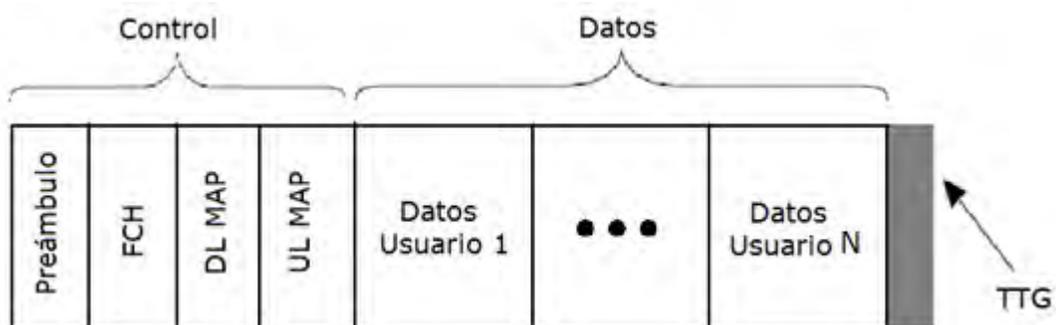


Figura 6.2: Subframe DL.

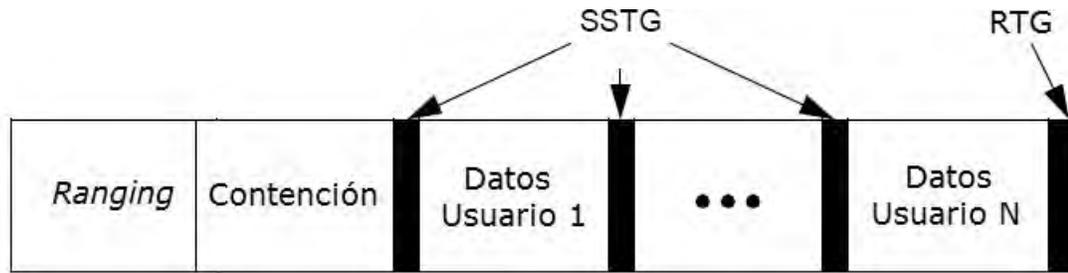


Figura 6.3: Subframe UL.

El tamaño que ocupa cada uno de los campos de control para los subframe DL y UL se muestran en la tabla 6.1[3].

Campo de control	Tamaño
Preámbulo (PB)	1 Símbolo
FCH	1 Símbolo
Ranging (RG)	2 Símbolos
Contención (Cont)	5 símbolos
DL-MAP	24 bytes
UL-MAP	47 bytes
TTG	4 Símbolos + 35 μs + t_p
RTG	4 Símbolos + 35 μs + t_p

Tabla 6.1: Tamaño de los campos de control.

6.1.2. Tiempo de un símbolo OFDM

Las fórmulas que se utilizan para el cálculo del tiempo que dura un símbolo OFDM se tomaron de la sección 3.7.2 de la página 49.

Primero se calcula la frecuencia de muestreo.

$$F_s = n \cdot BW = \left(\frac{8}{7}\right) \cdot (3.5MHz) = 4MHz \quad (6.1)$$

De 6.1 se puede calcular el espacio entre portadoras de cada símbolo.

$$\Delta f = \frac{F_s}{N_{FFT}} = \frac{4MHz}{256} = 15.625KHz. \quad (6.2)$$

Con 6.2 se puede calcular la duración de un símbolo útil.

$$T_b = \frac{1}{\Delta f} = \frac{1}{15.625KHz} = 64 \left[\frac{\mu s}{simb} \right] \quad (6.3)$$

Ahora se calcula el tiempo del Prefijo Cíclico.

$$T_g = G \cdot T_b = \frac{1}{16} \cdot 64 \left[\frac{\mu s}{simb} \right] = 4 \left[\frac{\mu s}{simb} \right] \quad (6.4)$$

Usando 6.3 y 6.4 se obtiene el tiempo de un símbolo OFDM.

$$T_s = T_b + T_g = 64 \left[\frac{\mu s}{simb} \right] + 4 \left[\frac{\mu s}{simb} \right] = 68 \left[\frac{\mu s}{simb} \right] \quad (6.5)$$

6.1.3. Símbolos usados para datos por canal

Ahora que se tiene el tiempo de un símbolo OFDM y tomando en cuenta que para esta tesis se considera que la duración de un Frame es de 10ms, se puede calcular la cantidad de símbolos OFDM que hay en un Frame.

$$\#simb = \frac{10 \left[\frac{ms}{Frame} \right]}{68 \left[\frac{\mu s}{simb} \right]} = 147 \left[\frac{simb}{Frame} \right] = 147.0588 \approx 147 \quad (6.6)$$

Hay que tomar en cuenta que no todos los símbolos del Frame se utilizan para el envío de datos, varios de ellos se utilizan como campos de control según lo define el estándar IEEE 802.16. En la tabla 6.1 se muestra cuales son los campos de control y el tamaño de cada uno de ellos, con los cuales se puede calcular el número de símbolos efectivamente utilizados para el envío de datos.

Se debe calcular el número de símbolos que ocupa el TTG y el RTG con base en la tabla 6.1.

$$TTG = 4[simb] + \frac{35\mu s}{68 \left[\frac{\mu s}{simb} \right]} = 4.514705[simb] \approx 5[simb] \quad (6.7)$$

$$RTG = 4[simb] + \frac{35\mu s}{68 \left[\frac{\mu s}{simb} \right]} = 4.514705[simb] \approx 5[simb] \quad (6.8)$$

De 6.7 y 6.8 se calcula el número de símbolos útiles en un frame.

$$simb_{utiles} = \#simb - (TTG + RTG) = 147[simb] - (5 + 5)[simb] = 137[simb] \quad (6.9)$$

De estos símbolos útiles se debe de considerar el 60 % para Downlink y el resto para Uplink (pues así está configurada la BS), considerando que debe ser una cantidad entera.

$$\begin{aligned} simb_{DL} &= simb_{utiles} \cdot 0.6 = 137[simb] \cdot 0.6 = 82.2[simb] \\ \Rightarrow simb_{DL} &= 82[simb] \end{aligned} \quad (6.10)$$

$$simb_{UL} = simb_{utiles} - simb_{DL} = 137[simb] - 82[simb] = 55[simb] \quad (6.11)$$

Ahora debemos de calcular cuántos de estos símbolos se utilizan para la transmisión de datos, para lo cual a 6.10 y 6.11 debemos de restarles los campos de control restantes.

Para el caso del DL subframe se deben de tomar en cuenta los campos DL-MAP y UL-MAP, los cuales son transmitidos usando una modulación QPSK 1/2 [15], donde el número de bits transmitidos es el igual al número de subportadoras utilizadas debido a la misma modulación.

$$UL - MAP = 47[bytes] \cdot 8 \left[\frac{bits}{byte} \right] = 376[bits] = 376[subportadoras] \quad (6.12)$$

$$DL - MAP = 24[bytes] \cdot 8 \left[\frac{bits}{byte} \right] = 192[bits] = 192[subportadoras] \quad (6.13)$$

Tomando en cuenta que la BS no realiza subcanalización, es decir, utiliza todas las portadoras para un mismo campo y las que no son utilizadas se desperdician. Entonces se tiene que el UL-MAP utiliza 2 símbolos y el DL-MAP utiliza 1 símbolo.

Con base en lo anterior y tomando en cuenta la tabla 6.1 se tiene:

$$\begin{aligned}
 simb_{DatosDL} &= simb_{DL} - (PB + FCH + UL - MAP + DL - MAP) \\
 &= 82[simb] - (1 + 1 + 2 + 1)[simb] \\
 &= 77[simb]
 \end{aligned} \tag{6.14}$$

$$\begin{aligned}
 simb_{DatosUL} &= simb_{UL} - (RG + Cont) \\
 &= 55[simb] - (2 + 5)[simb] \\
 &= 48[simb]
 \end{aligned} \tag{6.15}$$

6.1.4. Throughput por enlace

La tasa de transmisión por cada canal está dada de la siguiente forma:

$$R = N_{FFT_D} \cdot M \cdot CC \cdot \#SIMB \cdot \#Frames \tag{6.16}$$

Donde:

- N_{FFT_D} es el número de subportadoras de datos por símbolo (192).
- M es el número de bits por subportadora (depende de la modulación).
- CC es la tasa de codificación total (Reed Solomon + convolucional).
- $\#SIMB$ es el número de símbolos por frame (depende de cada canal).
- $\#Frames$ es el número de Frames por segundo (100, pues se consideran Frames de 10ms).

Tomando en cuenta una modulación de 64QAM 3/4, utilizando los resultados de

6.14 y 6.15 se procede a realizar el cálculo del *throughput* en cada canal de datos.

$$\begin{aligned}
 R_{DL} &= SD \cdot M \cdot CC \cdot \text{simb}_{\text{DatosDL}} \cdot \#Frames \\
 &= 192 \left[\frac{\text{subport}}{\text{simb}} \right] \cdot 6 \left[\frac{\text{bits}}{\text{subport}} \right] \cdot \frac{3}{4} \cdot 77 \left[\frac{\text{simb}}{\text{Frame}} \right] \cdot 100 \left[\frac{\text{Frames}}{s} \right] \\
 &= 6,652,800 \left[\frac{\text{bits}}{s} \right]
 \end{aligned} \tag{6.17}$$

$$\begin{aligned}
 R_{UL} &= SD \cdot M \cdot CC \cdot \text{simb}_{\text{DatosUL}} \cdot \#Frames \\
 &= 192 \left[\frac{\text{subport}}{\text{simb}} \right] \cdot 6 \left[\frac{\text{bits}}{\text{subport}} \right] \cdot \frac{3}{4} \cdot 48 \left[\frac{\text{simb}}{\text{Frame}} \right] \cdot 100 \left[\frac{\text{Frames}}{s} \right] \\
 &= 4,147,200 \left[\frac{\text{bits}}{s} \right]
 \end{aligned} \tag{6.18}$$

Se debe de tomar en cuenta que este *throughput* es a nivel de capa física, es decir, no se han considerado los encabezados que agregan las demás capas, por lo que en la práctica la eficiencia de estos canales se verá afectada.

Como se puede apreciar de los cálculos anteriores, los únicos valores que varían en cada canal son M y CC; es claro que el *throughput* va a variar dependiendo de los valores de estos parámetros. La tabla 6.2 muestra el *throughput* teórico dependiendo del tipo de modulación y tasa de codificación total, basado en la tabla 3.1.

Modulación	Tasa de Codificación	Throughput DL	Throughput UL
64QAM	3/4	6,652,800	4,147,200
64QAM	2/3	5,913,600	3,686,400
16QAM	3/4	4,435,200	2,764,800
16QAM	1/2	2,956,800	1,843,200
QPSK	3/4	2,217,600	1,382,400
QPSK	1/2	1,478,400	921,600
BPSK	1/2	739,200	460,800

Tabla 6.2: Modulación y Codificación respecto a SNR mínima.

6.2. Tasa de transferencia teórica garantizada

Una de las cosas que causa mucho interés al usuario es conocer la tasa de transferencia máxima que puede alcanzar dependiendo del lugar donde se encuentre. Para ello es necesario conocer el SNR, la modulación y la tasa de codificación que se puede utilizar en cada lugar.

En las mediciones que se hicieron con los equipos WiMAX dentro de C.U., se tomaron 2 tipos de datos muy importantes: la distancia y la modulación con codificación que se tiene en cada lugar donde se tomaron mediciones.

Para poder hacer un análisis que incluya la modulación con tasa de codificación, hace falta encontrar una manera de graficar la modulación con codificación, por lo cual a cada pareja de valores posibles se le ha asignado un código que puede ser representado en una gráfica, tal y como se muestra en la tabla 6.3.

Modulación	Tasa de Codificación	Código
64QAM	3/4	7
64QAM	2/3	6
16QAM	3/4	5
16QAM	1/2	4
QPSK	3/4	3
QPSK	1/2	2
BPSK	1/2	1

Tabla 6.3: Modulación y Codificación respecto a SNR mínima.

La figura 6.4 muestra la modulación y tasa de codificación que proporcionaba la BS dependiendo de la distancia a la que se tomó cada medición.

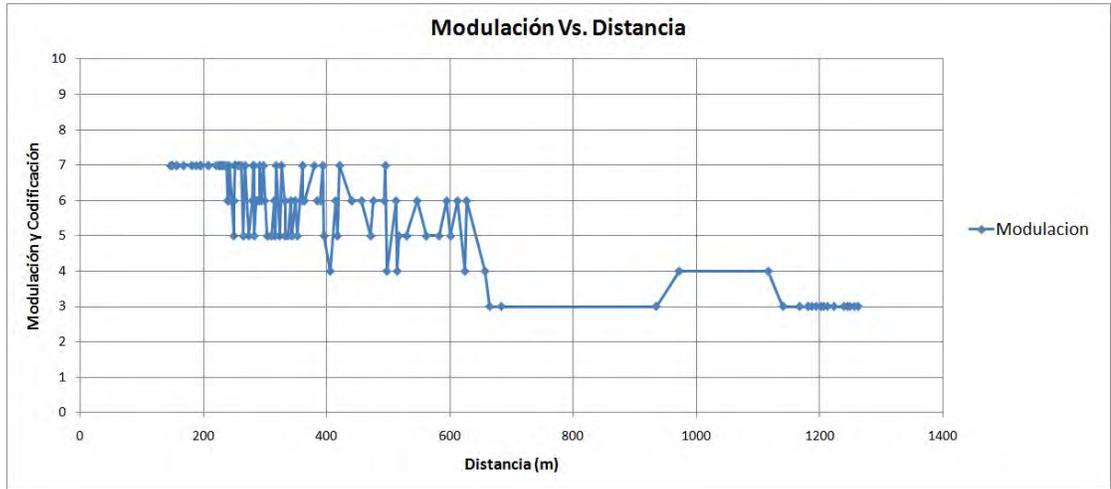


Figura 6.4: Modulación con tasa de codificación Vs. Distancia.

6.2.1. Máxima tasa de transferencia teórica garantizada

Se define la Máxima tasa de transferencia teórica garantizada como la tasa de transferencia teórica que se puede alcanzar dependiendo de la distancia entre la BS y la SS sin necesidad de conocer el SNR, por ejemplo en la figura 6.4 se puede ver que a 300m de la BS se puede tener una de 3 modulaciones con tasa de codificación posibles, a decir 64QAM 3/4, 64QAM 2/3 y 16QAM 3/4, sin embargo no es posible saber cual de ellas nos asignará la BS, pero dado que la mínima es de 16QAM 3/4, por la tabla 6.2 se puede garantizar que la máxima tasa de transferencia teórica al menos será de 4,435,200 bits/s y 2,764,800 bits/s para los canales Downlink y Uplink respectivamente.

Con base en lo anterior se puede dividir los terrenos en varias secciones, dependiendo de la Máxima tasa de transferencia teórica garantizada, mediante lo cual se puede saber la tasa de transferencia que puede tener cada usuario dependiendo del lugar donde se encuentre, sin necesidad de hacer alguna otra medición.

Para los fines de esta tesis se ha dividido y numerado el terreno analizado en varias secciones de acuerdo a la figura 6.5, tal y como se muestra en la figura 6.6.



Figura 6.5: Secciones según la Modulación y tasa de codificación.

La sección 1 de las figuras 6.5 y 6.6 representa el terreno en el cual podemos garantizar una modulación con tasa de codificación de 64QAM 3/4 y por lo tanto se garantiza una tasa de transferencia de 6,652,800 bits/s y 4,147,200 bits/s para los canales Downlink y Uplink respectivamente. Además cabe señalar que abarca un radio de 239 metros.

La sección 2 de las figuras 6.5 y 6.6 representa el terreno en el cual podemos garantizar una modulación con tasa de codificación de 16QAM 3/4 y por lo tanto se garantiza una tasa de transferencia de 4,435,200 bits/s y 2,764,800 bits/s para los canales Downlink y Uplink respectivamente. Sin embargo de la gráfica 6.5 se puede ver que en esta misma sección se puede alcanzar una mejor modulación, aunque no se se puede garantizar este hecho. Además cabe señalar que abarca un terreno que va de los 239 metros a los 405 metros.

La sección 3 de las figuras 6.5 y 6.6 representa el terreno en el cual podemos garantizar una modulación con tasa de codificación de 16QAM 1/2 y por lo tanto se garantiza una tasa de transferencia de 2,956,800 bits/s y 1,843,200 bits/s para los canales Downlink y Uplink respectivamente. No obstante, de la gráfica 6.5 se puede ver que en esta misma sección se puede alcanzar una mejor modulación, aunque no se se

puede garantizar este hecho. Además cabe señalar que abarca un terreno que va de los 405 metros a los 664 metros.

La sección 4 de las figuras 6.5 y 6.6 representa el terreno en el cual podemos garantizar una modulación con tasa de codificación de QPSK 3/4 y por lo tanto se garantiza una tasa de transferencia de 2,217,600 bits/s y 1,382,400 bits/s para los canales Downlink y Uplink respectivamente, sin embargo de la gráfica 6.5 se puede ver que en esta misma sección se puede alcanzar una mejor modulación, aunque no se se puede garantizar este hecho. Además cabe señalar que abarca un terreno que va de los 664 metros a los 1,262 metros.



Figura 6.6: Mapa de mediciones seccionado.

Capítulo 7

Análisis de los datos Teóricos y Experimentales

En este capítulo se realiza el análisis de los datos teóricos, mostrando paso a paso como obtener los valores necesarios para hacer una comparación con los datos experimentales.

Posteriormente se hace un análisis de los datos experimentales obtenidos, verificando primeramente la validez de estos y procediendo así a la comparación con los datos teóricos.

Por último, se procede a hacer el ajuste de los parámetros que son necesarios para poder hacer un modelo teórico más exacto en relación al tipo de terreno que se está estudiando, que para este caso es una parte del terreno que ocupa UNAM en la Ciudad Universitaria.

7.1. Procesamiento y Análisis de los datos

7.1.1. Datos teóricos

La tabla 7.1 muestra los datos reales que se usaron para hacer las mediciones y para obtener los modelos teóricos.

Datos (unidad)	Valor
Frecuencia de Operación, f (MHz)	3478.5
Ancho de banda del canal (MHz)	3.5
Altura de la antena de la BS, h_{bs} (m)	35
Altura de la antena del SU-I, h_{ss} (m)	$1.25 \approx 2$
Potencia de la antena transmisora, P_{tx} (dB)	-7
Ganancia de la antena transmisora, G_{tx} (dBi)	14.8
Ganancia de la antena receptora, G_{rx} (dBi)	10.5
Pérdida por cable y conectores en la BS, L_c (db)	0.5
Temperatura del ambien, T (°kelvin)	293
Figura de ruido del receptor, N_f (dB)	5
Constante de Boltzmann, K_o (J/K)	1.38E-23
Longitud de onda, λ (m)	0.086244071
d_o (m)	100

Tabla 7.1: Parámetros utilizados para obtener los modelos ERCEG.

La altura de la antena receptora se tomará como 2m debido a que en las fórmulas se requiere que este valor se encuentre entre 2m y 10m.

Los cálculos y las gráficas para las curvas teóricas de pérdida por trayectoria, nivel de potencia recibida y la relación señal a ruido en función de la distancia entre la antena transmisora y la antena receptora para los modelos ERCEG, se realizaron en excel.

Para poder obtener los valores teóricos (Path Loss, Potencia de recepción y de la relación señal a ruido), requerimos del uso de las ecuaciones dadas en la sección 4.2.1 de la página 56, es decir:

$$PL = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + \mu_{\sigma} + Cf + Ch; \quad d > d_o \quad (7.1)$$

$$P_{rx} = PIRE + G_{rx} - PL \quad (7.2)$$

$$SNR = P_{rx} - N \quad (7.3)$$

Para ello calculamos primero los siguientes valores:

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d_o}{\lambda} \right) \quad (7.4)$$

$$\gamma = \left(a - b \cdot h_{bs} + \frac{c}{h_{bs}} \right) \quad (7.5)$$

$$C_f = 6 \cdot \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (7.6)$$

$$C_h = -10.8 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_{ss}}{2} \right); \quad \text{para Cat. A y Cat. B} \quad (7.7)$$

$$C_h = -20 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_{ss}}{2} \right); \quad \text{para Cat. C} \quad (7.8)$$

Sustituimos los valores de las tablas 7.1 y 4.1 en las fórmulas 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 y 7.8, obtenemos:

$$A = 83.26961234 \quad (7.9)$$

$$\gamma = 4.6975 \quad \text{para Cat. A} \quad (7.10)$$

$$\gamma = 4.261071429 \quad \text{para Cat. B} \quad (7.11)$$

$$\gamma = 3.996428571 \quad \text{para Cat. C} \quad (7.12)$$

$$C_f = 1.442172072 \quad (7.13)$$

$$C_h = 0; \quad \text{para Cat. A, Cat. B y Cat. C} \quad (7.14)$$

Sustituyendo los valores de μ_σ dados en la tabla 4.1 y los valores de las fórmulas 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, 7.13 y 7.14 en la fórmula 7.1, tenemos:

$$PL [dB] = \begin{cases} 46.975 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) + 95.31178441; & \text{Cat. A} \quad (7.15) \\ 42.61071429 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) + 94.31178441; & \text{Cat. B} \quad (7.16) \\ 39.96428571 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) + 92.91178441; & \text{Cat. C} \quad (7.17) \end{cases}$$

Ahora calculamos el PIRE:

$$PIRE = P_{tx} + G_{tx} - Lc \quad (7.18)$$

Sustituyendo los valores de la tabla 7.1 en la fórmula 7.18 tenemos:

$$PIRE [dBm] = 37.3 \quad (7.19)$$

Sustituyendo el valor de G_{rx} de la tabla 7.1 y los valores de las fórmulas 7.19, 7.15, 7.16, 7.17 en la fórmula 7.2 tenemos:

$$P_{rx} [dBm] = \begin{cases} -46.975 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) - 47.51178441; & \text{Cat. A (7.20)} \\ -42.61071429 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) - 46.51178441; & \text{Cat. B (7.21)} \\ -39.96428571 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) - 45.11178441; & \text{Cat. C (7.22)} \end{cases}$$

Ahora solo nos falta calcular el valor de N (Ruido térmico), usando los valores de la tabla 7.1 tenemos:

$$\begin{aligned} N [dB] &= 10 \cdot \text{LOG}_{10}(T \cdot BW \cdot Ko) + Nf \\ &= -133.4918525 \end{aligned} \quad (7.23)$$

Sustituyendo los valores de las fórmulas 7.23, 7.20, 7.21 y 7.22 en la fórmula 7.3

obtenemos:

$$\begin{aligned}
 SNR [dB] &= -46.975 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) + 55.98006808; \\
 &= -46.975 \cdot \log_{10}(d) + 55.98006808 + 46.975 \cdot \log_{10}(100) \\
 &= -46.975 \cdot \log_{10}(d) + 55.98006808 + 93.95 \\
 &= -46.975 \cdot \log_{10}(d) + 149.9300681; \quad \text{Para Cat. A} \quad (7.24)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SNR [dB] &= -42.61071429 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) + 56.98006808; \\
 &= -42.61071429 \cdot \log_{10}(d) + 56.98006808 + 42.61071429 \cdot \log_{10}(100) \\
 &= -42.61071429 \cdot \log_{10}(d) + 56.98006808 + 85.22142857 \\
 &= -42.61071429 \cdot \log_{10}(d) + 142.2014966; \quad \text{Para Cat. B} \quad (7.25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SNR [dB] &= -39.96428571 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{100} \right) + 58.38006808; \\
 &= -39.96428571 \cdot \log_{10}(d) + 58.38006808 + 39.96428571 \cdot \log_{10}(100); \\
 &= -39.96428571 \cdot \log_{10}(d) + 58.38006808 + 79.92857143; \\
 &= -39.96428571 \cdot \log_{10}(d) + 138.3086395; \quad \text{Para Cat. C} \quad (7.26)
 \end{aligned}$$

Donde $d > 100$.

Ahora ya tenemos todos los datos para poder hacer las gráficas teóricas.

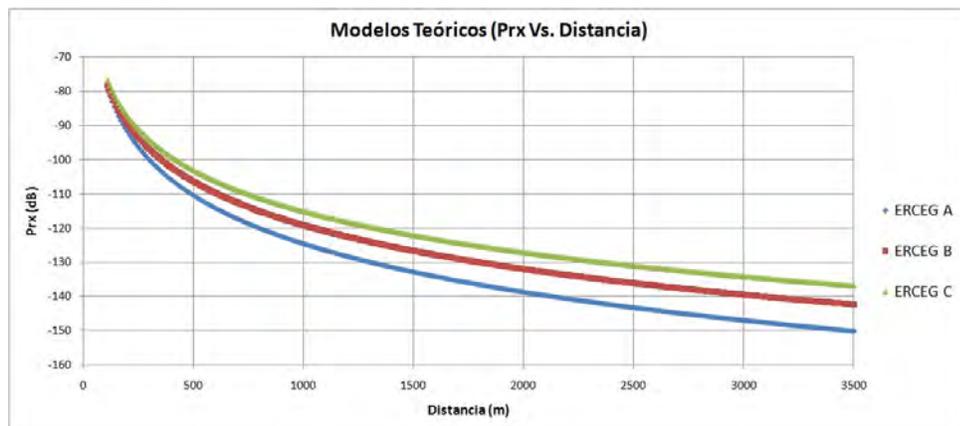


Figura 7.1: Modelos de propagación ERCEG (Prx Vs. Distancia).

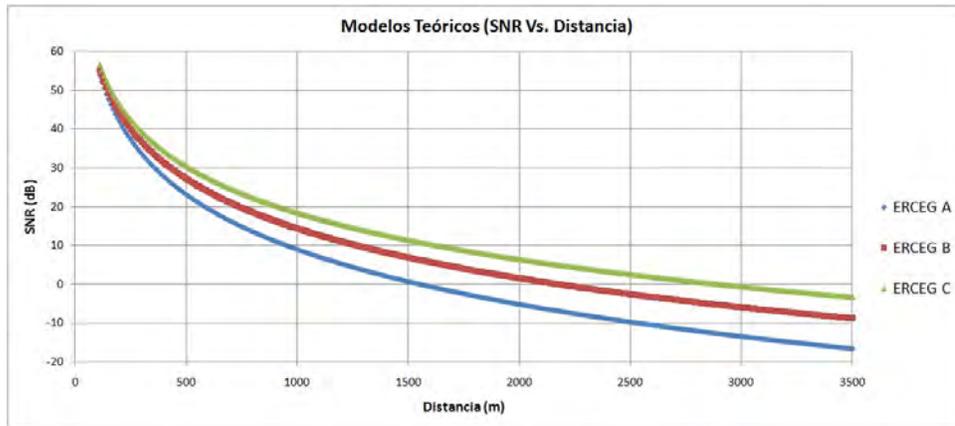


Figura 7.2: Modelos de propagación ERCEG (SNR Vs. Distancia).

7.1.2. Datos experimentales

Se pretende tomar mediciones en ciertas regiones dentro de C.U. y en algunos lugares aledaños, tal como se muestra en la figura 7.3.

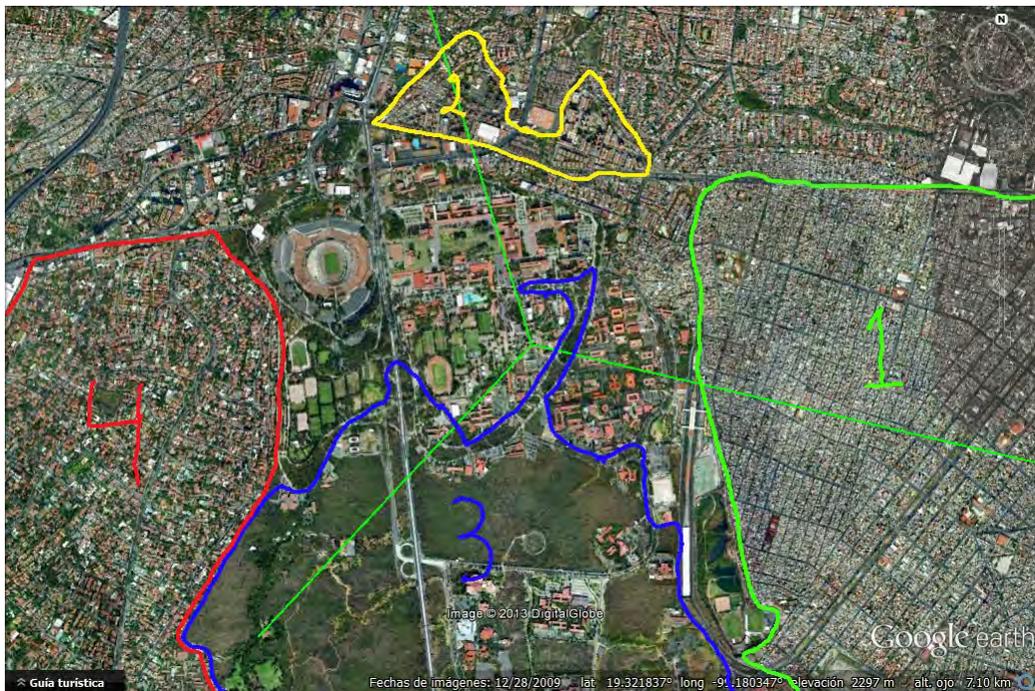


Figura 7.3: Regiones seleccionadas para analizar.

En principio se trató de analizar la región 1, que es una zona con muchas casas, sin embargo la señal de la radio base se atenúa tanto que tan solo alcanzamos a tomar una medición en una calle cuyo terreno es lo suficientemente elevado para ello; posteriormente se trató de analizar la región 2, que es una zona con muchos edificios altos, sin embargo no alcanzamos a tomar ninguna medición. Por tales razones no se puede realizar ningún tipo de análisis en estas regiones.

Ahora procedemos a analizar la región 3, la cual es una zona que parece elevarse de manera irregular y que además posee una alta densidad de árboles, se tomaron muestras de 2 maneras diferentes como se explicó en el capítulo 5 (a 2 diferentes alturas), por lo cual se tiene en la figura 7.4 2 marcas diferentes, unas de color amarillo y otras de color azul, siendo las amarillas las mediciones tomadas usando una camioneta (a una altura de 1.25 m) y las azules las mediciones tomadas usando un diablito (a una altura de 2.6 m); además cabe señalar que de las muestras tomadas se recabaron 3 tipos de datos, es decir, se tomó en cuenta el SNR medido por el SUI y el RSSI (Prx) del Uplink y Downlink medidos en la radio base.



Figura 7.4: Mapa de la mediciones tomadas en la región 3.

7.1.2.1. Mediciones tomadas usando una camioneta

Primeramente se analizan los datos que se tomaron usando una camioneta, es decir, se analizarán todos los datos que se tomaron a una altura de 1.25 m.

En las figuras 7.5, 7.6 y 7.7 se puede ver los datos recabados de SNR, P_{rx} (Downlink) y P_{rx} (Uplink) graficados contra la distancia. Con los datos de estas figuras primeramente haremos un análisis para mostrar que los datos se tomaron correctamente y que los equipos están bien calibrados, verificando así la validez de estos.

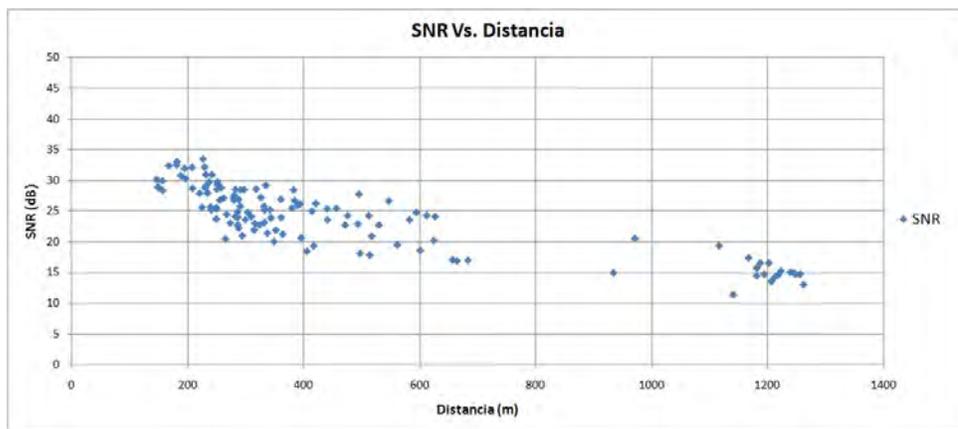


Figura 7.5: Gráfica de los valores del SNR recabados usando una camioneta.

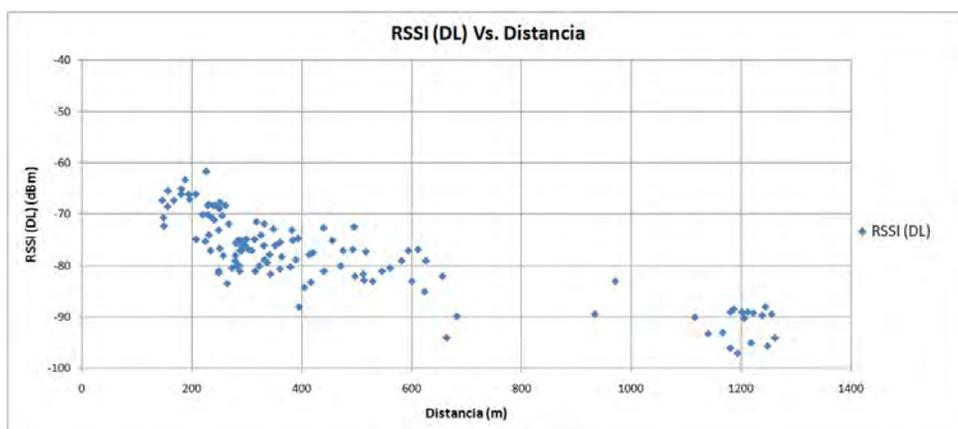


Figura 7.6: Gráfica de los valores del P_{rx} (Downlink) recabados usando una camioneta.

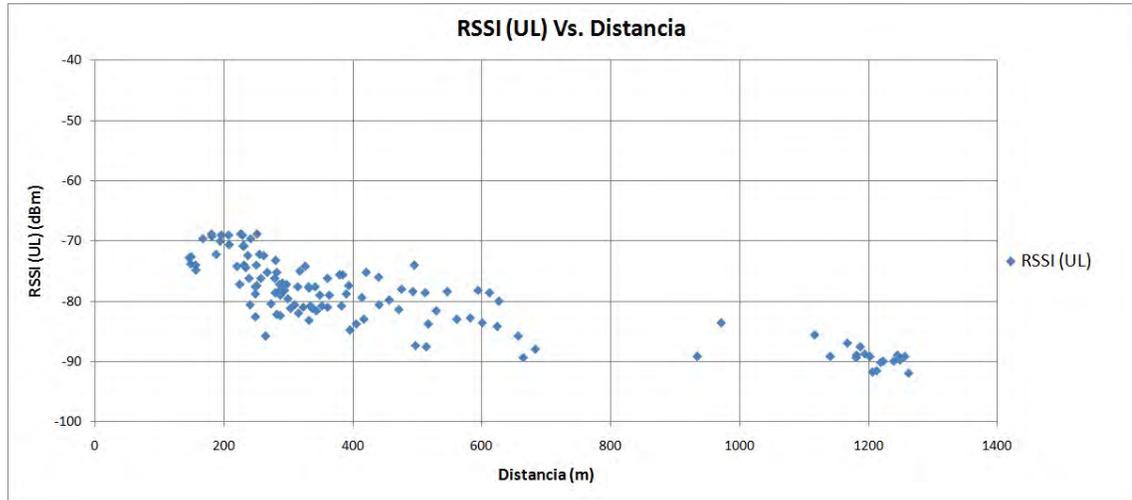


Figura 7.7: Gráfica de los valores del P_{rx} (Uplink) recabados usando una camioneta.

Se sabe que la fórmula 7.3 involucra los valores medidos por el SUI y los valores medidos por la radio base, así mediante un despeje podemos comparar el valor de N experimental contra el valor de N teórico en cada punto donde se tomaron las mediciones. La fórmula despejada queda de la siguiente manera:

$$N = P_{rx} - SNR \quad (7.27)$$

Como la radio base mide el RSSI del downlink y el uplink, se deben de hacer dos comparaciones de los datos experimentales contra los teóricos; para hacer dichas comparaciones se calcula el valor de N en cada punto donde se hizo una medición, donde el valor teórico siempre es el mismo en cada punto y está dado en la fórmula 7.23.

La figura 7.8 muestra la comparación del valor de N teórico y el valor de N experimental utilizando el RSSI del Downlink; la línea verde indica donde se encuentra ubicado el valor teórico en la gráfica, el cual se encuentra escrito de color verde a la derecha de la gráfica y la línea roja indica el valor del promedio de todos los valores de N obtenidos de manera experimental (los cuales están pintados con puntos color

azul en la gráfica), el cual está escrito de color rojo a la derecha de la gráfica. Así con el valor de N teórico y con el valor de N dado como el promedio de los valores experimentales, se obtiene el error total en las mediciones, dicho valor está dado en la fórmula 7.28.

$$\begin{aligned}
 Error [\%] &= \left| \frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Promedio Experimental}}{\text{Valor Teórico}} \right| \cdot 100 \\
 &= \left| \frac{(-133.491852488944) - (-132.051370499419)}{-133.491852488944} \right| \cdot 100 \\
 &= \left| \frac{-1.44048199}{-133.491852488944} \right| \cdot 100 \\
 &= 1.0790786
 \end{aligned} \tag{7.28}$$

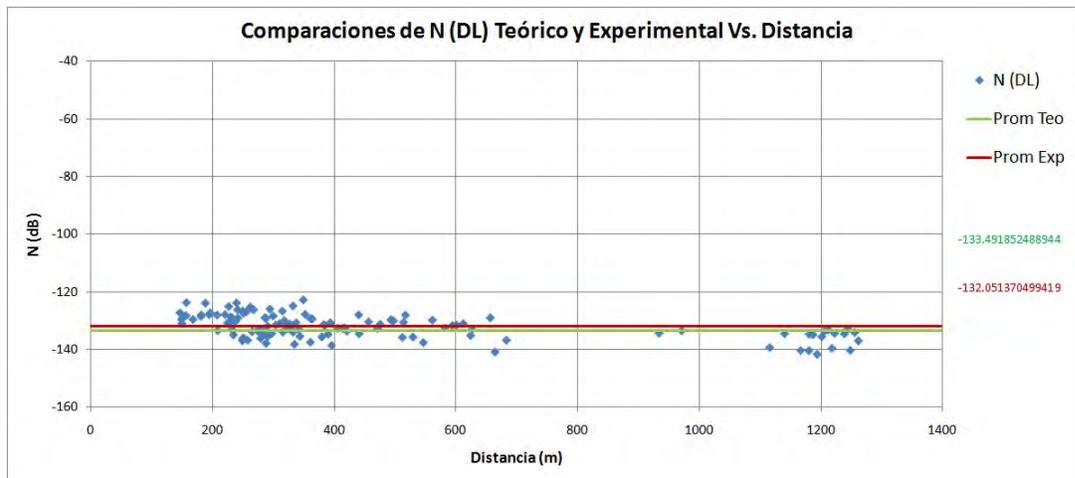


Figura 7.8: Gráfica de la comparación de N Teórico y Experimental usando una camioneta, tomando el RSSI del Downlink.

Como se puede ver, el error dado en la fórmula 7.28 es a penas un poco mayor del 1%, lo cual indica que los equipos están muy bien calibrados y que las mediciones obtenidas son confiables.

La figura 7.9 muestra la comparación del valor de N teórico y el valor de N experimental utilizando el RSSI del Uplink; la línea verde indica donde se encuentra ubicado el valor teórico en la gráfica, el cual se encuentra escrito de color verde a la

derecha de la gráfica y la línea roja indica el valor del promedio de todos los valores de N obtenidos de manera experimental (los cuales están pintados con puntos color azul en la gráfica), el cual está escrito de color rojo a la derecha de la gráfica. Así con el valor de N teórico y con el valor de N dado como el promedio de los valores experimentales, se obtiene el error total en las mediciones, dicho valor está dado en la fórmula 7.29.

$$\begin{aligned}
 \text{Error} [\%] &= \left| \frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Promedio Experimental}}{\text{Valor Teórico}} \right| \cdot 100 \\
 &= \left| \frac{(-133.491852488944) - (-133.326438250097)}{-133.491852488944} \right| \cdot 100 \\
 &= \left| \frac{-0.165414239}{-133.491852488944} \right| \cdot 100 \\
 &= 0.1239134
 \end{aligned} \tag{7.29}$$

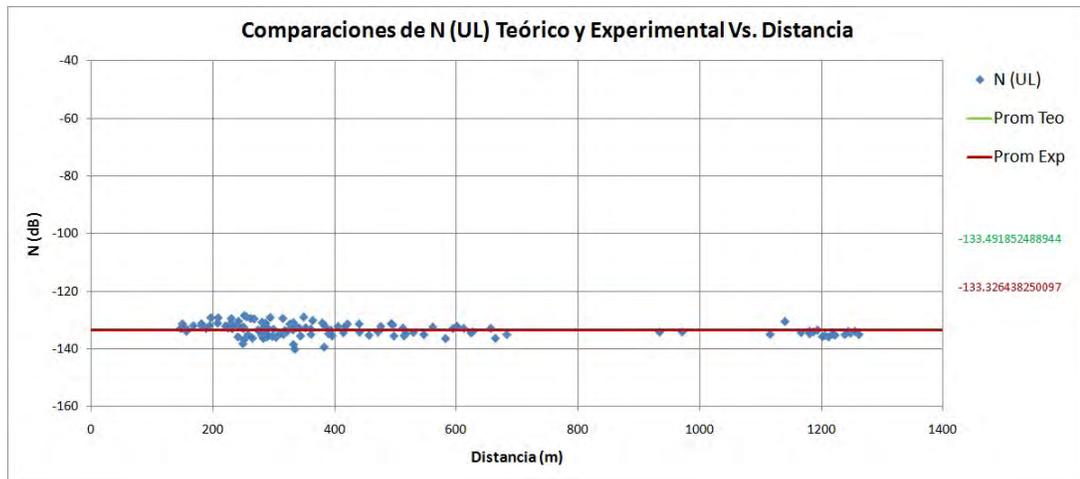


Figura 7.9: Gráfica de la comparación de N Teórico y Experimental usando una camioneta, tomando el RSSI del Uplink.

Como se puede ver, el error dado en la fórmula 7.29 es a penas un poco mayor del 0.1 %, lo cual indica que los equipos está muy bien calibrados y que las mediciones obtenidas son confiables.

A continuación se hace el análisis de los datos y las comparaciones con los modelos

teóricos, haciendo notar que solamente se trabajará con los datos obtenidos por el SUI, es decir, se trabajará solamente con los datos dados en el figura 7.5, ya que del análisis anterior se puede ver que los datos del SUI y de la radio base son muy similares, tomando en cuenta que solamente están defasados por el valor de N.

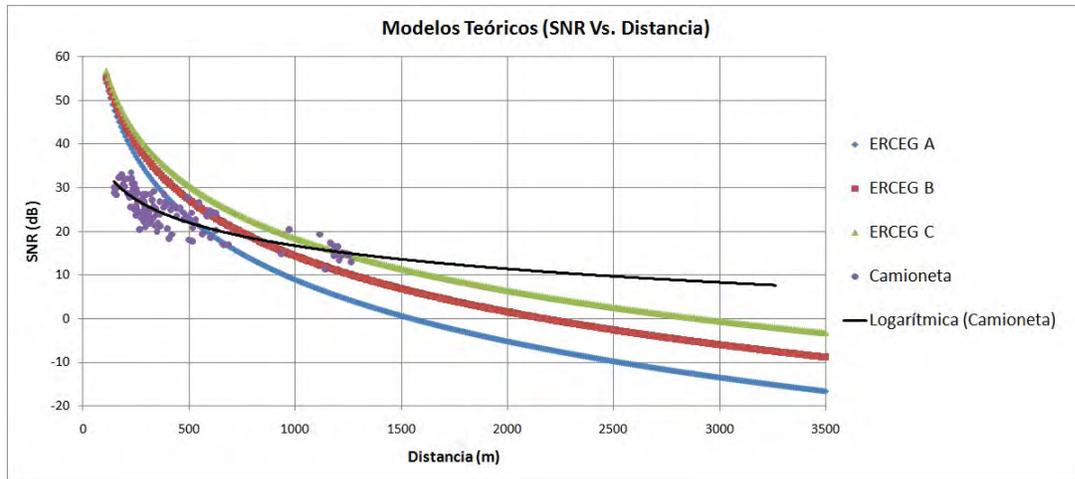


Figura 7.10: Comparación entre las mediciones experimentales y teóricas.

En la figura 7.10 se puede ver la comparación de las curvas teóricas (mostradas en la gráfica 7.2) con la curva de regresión de los datos experimentales (mostrados en la gráfica 7.5). Se puede ver que ningún modelo teórico se aproxima a la curva experimental, lo cual se debe a que el tipo de terreno considerado no es igual a ninguno de los descritos por el modelo ERCEG, es decir, el terreno considerado presenta una alta densidad de árboles como en el terreno categoría A (por lo cual no se parece a los terrenos categoría B y C), sin embargo presenta un ligero decremento en la altura del suelo en algunas partes del terreno, pero presenta también un incremento considerable en la altura del suelo en la mayor parte del terreno.



Figura 7.11: Aproximación del comportamiento del terreno.

Como se puede observar en la figura 7.11, el terreno analizado no corresponde con ninguno de los descritos por el modelo ERCEG, sin embargo en las fórmulas de los modelos teóricos se considera siempre algo muy importante, la altura del suelo y del SU-I no varían. Debido a esta consideración la curva experimental no se parece a las curvas teóricas, por lo cual es necesario hacer algunos arreglos para poder hacer una buena comparación entre los resultados teóricos y experimentales.

7.1.2.2. Arreglos propuestos para los modelos teóricos

Para arreglar las fórmulas teóricas se propone considerar el nivel topográfico en cada punto donde se hicieron las mediciones. En esta propuesta se consideró que el piso, a partir del cual se mide la altura de la radio base, sería el punto cuyo nivel topográfico fuera el menor, bajándolo incluso 0.75 metros más para considerar la altura del SUI igual a 2 (pues las mediciones se hicieron a 1.25 m del suelo). Así entonces la altura del SU-I sería variable y se considerará como 2 m (altura del SUI en la camioneta) más la diferencia entre el nivel topográfico en cada punto donde se hicieron mediciones y el piso.

La figura 7.12 nos muestra como se debe de tomar en cuenta la propuesta.

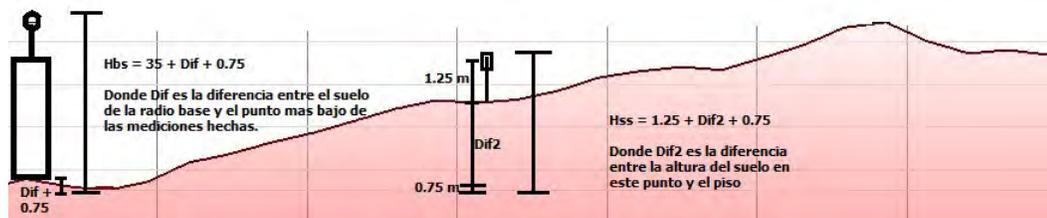


Figura 7.12: Propuesta.

La figura 7.13 muestra los datos teóricos calculados usando la propuesta de solución y comparados con los datos experimentales mostrados en la figura 7.5.

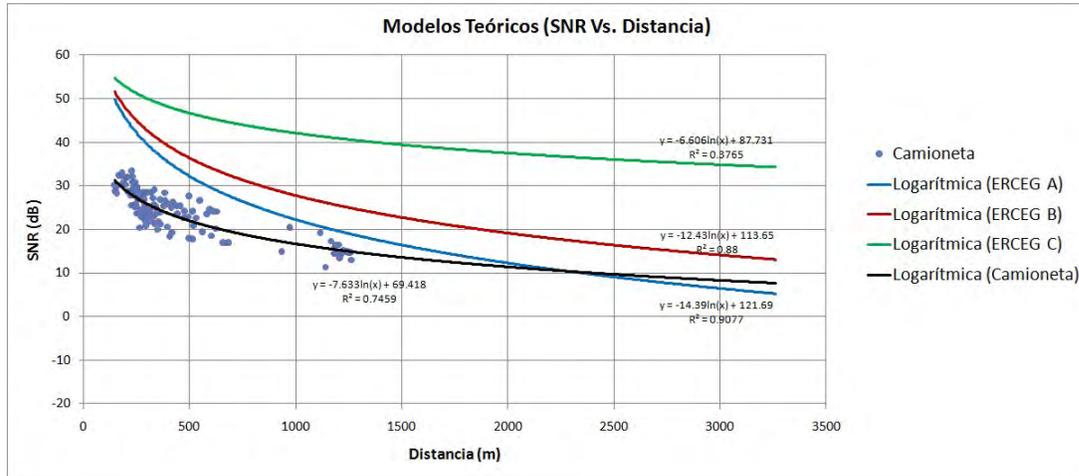


Figura 7.13: Comparación de los datos experimentales y los datos teóricos usando la propuesta.

Como se puede ver en la figura 7.13, los datos experimentales parecen ajustarse mejor a los datos teóricos, es más, los datos experimentales parecen estar entre los terrenos descritos por el Modelo ERCERG tipo B y C si se traslada la curva de regresión 22 dB, tal como se muestra en la figura 7.14.

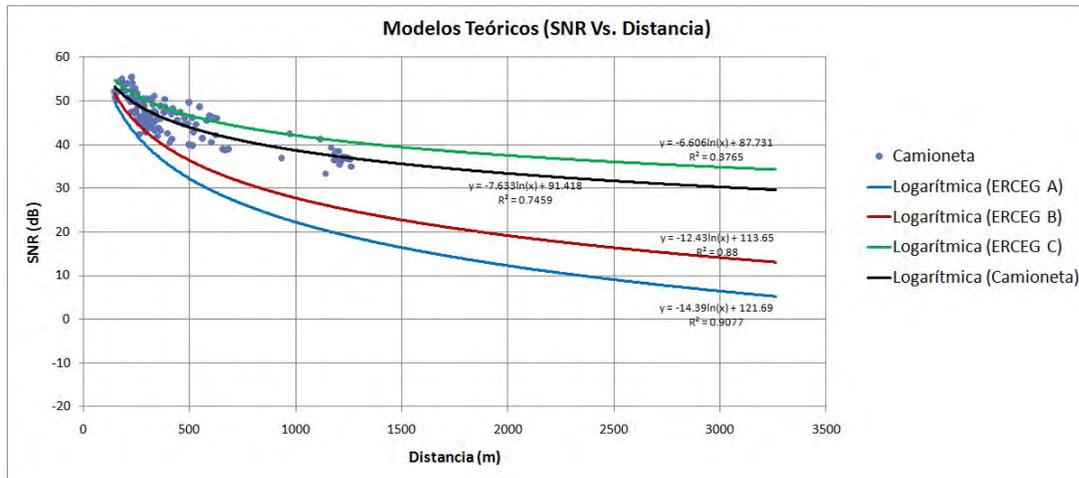


Figura 7.14: Ajuste del defasamiento de los datos.

Como se puede ver en las figuras 7.13 y 7.14, se han obtenido las ecuaciones de las curvas ajustadas y los valores del índice de correlación, tanto de los datos teóricos

modificados, como de los datos experimentales, aunque el índice de correlación de los datos experimentales es de 0.74588368, tomando en cuenta que el terreno es un poco inestable en cuanto a la altura del suelo y un poco difícil de describir comparado con los modelos ERCEG, este índice no es tan malo, es decir, comparado con el índice de correlación de los datos teóricos modificados, de 0.90767437 para el terreno tipo A, de 0.87998887 para el terreno tipo B y de 0.37647080 para el terreno tipo C, podemos ver que no es tan malo, sobre todo comparado con el del terreno tipo C, cuyo índice de correlación es demasiado bajo.

Así se tiene que haciendo esta modificación a los valores de los modelos teóricos, podemos ver que los datos experimentales no se comportan de una manera tan fuera de lo normal.

Como se ha visto, la propuesta que se hizo describe mejor lo que realmente está pasando con los datos experimentales, sin embargo el índice de correlación muy bajo del terreno tipo C obliga de cierta manera a buscar y pensar en otra solución, por ello a continuación se hace otro análisis utilizando las fórmulas del modelo ERCEG Extendido, descrito en el capítulo 4.

7.1.2.3. Una nueva propuesta

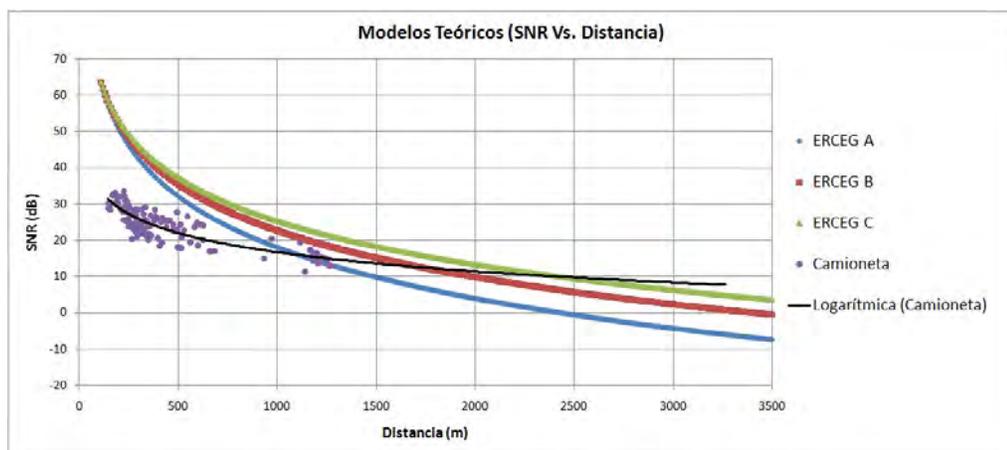


Figura 7.15: Comparación de los datos experimentales y los datos teóricos usando el modelo ERCEG Extendido.

Las fórmulas de modelo ERCEG Extendido solamente presentan un offset con respecto a las fórmulas de los modelos ERCEG a partir de cierta distancia. Así de esta manera es claro que al comparar el modelo ERCEG Extendido con los datos experimentales las gráficas sean muy parecidas a las presentadas en la figura 7.5.

A continuación se verá el comportamiento de las fórmulas del modelo ERCEG Extendido utilizando la primera propuesta.

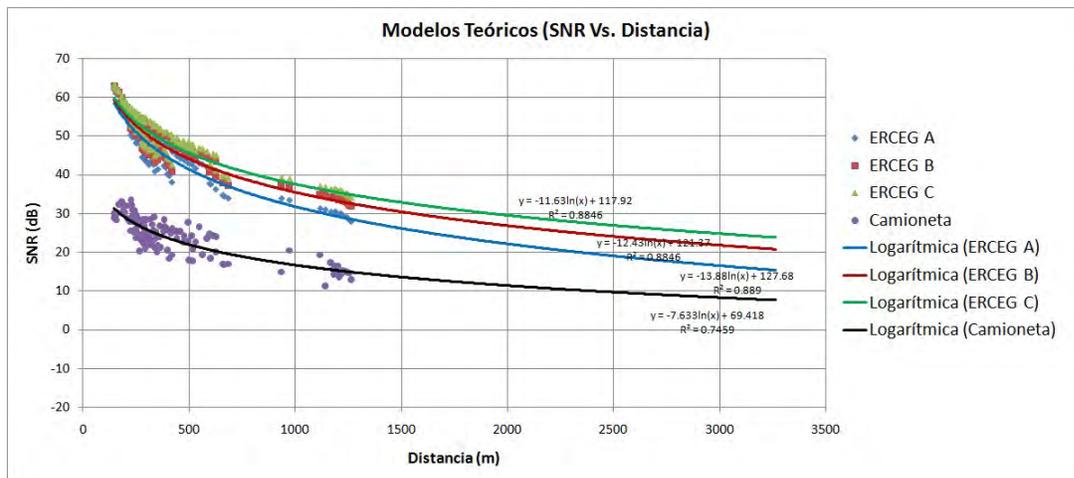


Figura 7.16: Comparación de los datos usando la primera propuesta en el modelo ERCEG Extendido.

En la figura 7.16 se puede ver que las gráficas teóricas son más consistentes con los datos experimentales que tenemos, es decir, la manera en que se degrada la señal es similar en comparación con la figura 7.13. De igual manera se puede ver que los índices de correlación de las curvas teóricas ajustadas son mejores, es decir, ninguno baja de 0.88.

7.1.2.4. Mediciones tomadas usando un diablito

Una manera de corroborar los datos experimentales anteriormente expuestos es tomarlos de nuevo pero aumentando la altura del SUI, con lo cual se espera que

la nueva curva experimental ajustada quede por encima de la anterior. Para este caso la altura tomada usando un diablito fue de 2.6 m.

En las figuras 7.17, 7.18 y 7.19 podemos ver los datos recabados de SNR, P_{rx} (Downlink) y P_{rx} (Uplink) graficados contra la distancia. Con los datos de estas figuras primeramente haremos un análisis para mostrar que los estos se tomaron correctamente y que los equipos están bien calibrados, verificando así su validez.

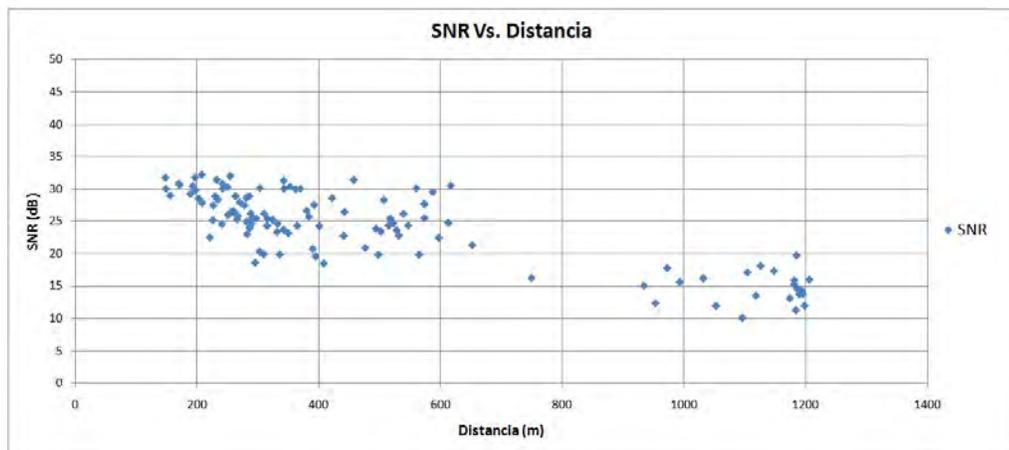


Figura 7.17: Gráfica de los valores del SNR recabados usando un diablito.

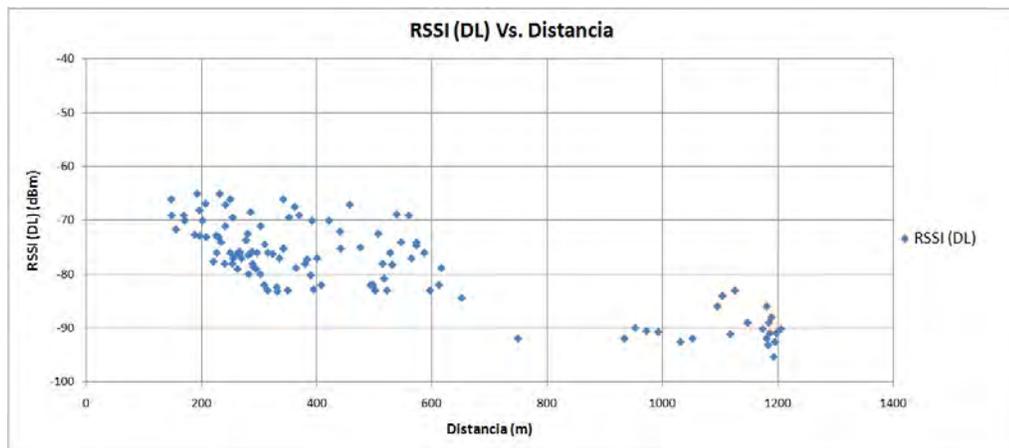


Figura 7.18: Gráfica de los valores del P_{rx} (Downlink) recabados usando un diablito.

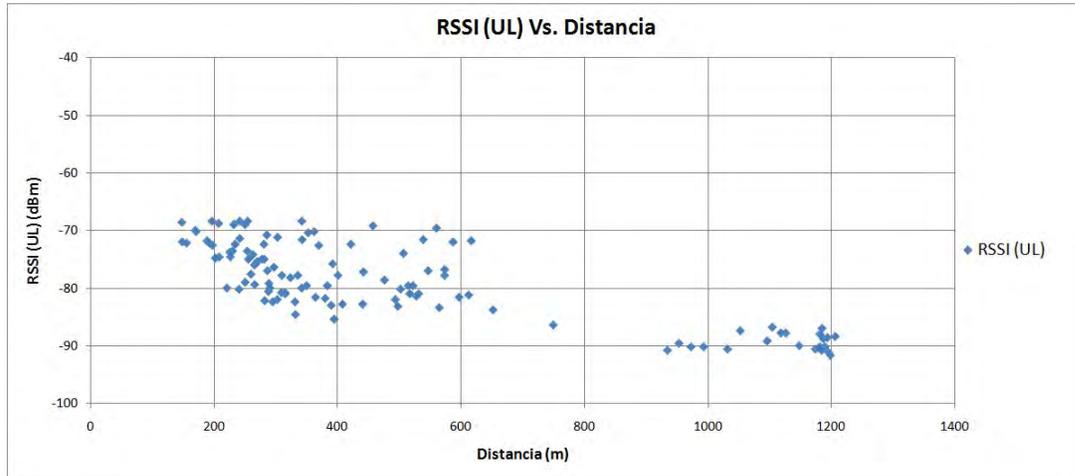


Figura 7.19: Gráfica de los valores del P_{rx} (Uplink) recabados usando un diablito.

Se sabe que la fórmula 6.3 involucra los valores medidos por el SUI y los valores medidos por la radio base, así mediante un despeje se puede comparar el valor de N experimental contra el valor de N teórico en cada punto donde se tomaron las mediciones. La fórmula despejada queda como la fórmula 7.27.

Como la radio base mide el RSSI del downlink y el uplink, se debe de hacer dos comparaciones de los datos experimentales contra los teóricos; para hacer dichas comparaciones se debe calcular el valor de N en cada punto donde se hizo una medición, donde el valor teórico siempre es el mismo en cada punto y está dado en la fórmula 7.23.

La figura 7.20 muestra la comparación del valor de N teórico y el valor de N experimental utilizando el RSSI del Downlink; la línea verde indica donde se encuentra ubicado el valor teórico en la gráfica, el cual se encuentra escrito de color verde a la derecha de la gráfica y la línea roja indica el valor del promedio de todos los valores de N obtenidos de manera experimental (los cuales están pintados con puntos color azul en la gráfica), el cual está escrito de color rojo a la derecha de la gráfica. Así con el valor de N teórico y con el valor de N dado como el promedio de los valores experimentales, se obtiene el error total en las mediciones, dicho valor está dado en la fórmula 7.30.

$$\begin{aligned}
 \text{Error} [\%] &= \left| \frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Promedio Experimental}}{\text{Valor Teórico}} \right| \cdot 100 \\
 &= \left| \frac{(-133.491852488944) - (-132.071034482759)}{-133.491852488944} \right| \cdot 100 \\
 &= \left| \frac{-1.420818006}{-133.491852488944} \right| \cdot 100 \\
 &= 1.0643481
 \end{aligned} \tag{7.30}$$

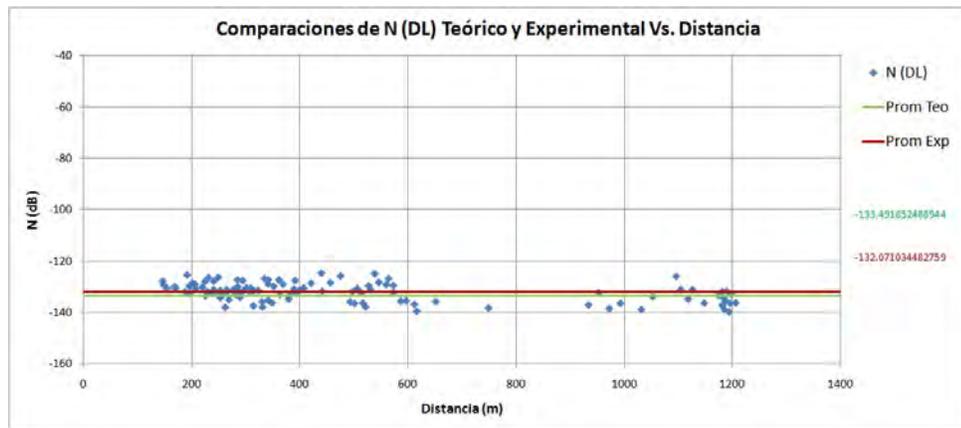


Figura 7.20: Gráfica de la comparación de N Teórico y Experimental usando un diablito, tomando el RSSI del Downlink.

Como se puede ver, el error dado en la fórmula 7.30 es a penas un poco mayor del 1 %, lo cual indica que los equipos está muy bien calibrados y que las mediciones obtenidas son confiables.

La figura 7.21 muestra la comparación del valor de N teórico y el valor de N experimental utilizando el RSSI del Uplink; la línea verde indica donde se encuentra ubicado el valor teórico en la gráfica, el cual se encuentra escrito de color verde a la derecha de la gráfica y la línea roja indica el valor del promedio de todos los valores de N obtenidos de manera experimental (los cuales están pintados con puntos color azul en la gráfica), el cual está escrito de color rojo a la derecha de la gráfica. Así con el valor de N teórico y con el valor de N dado como el promedio de los valores experimentales, se obtiene el error total en las mediciones, dicho valor está dado en la fórmula 7.31.

$$\begin{aligned}
 \text{Error} [\%] &= \left| \frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor Promedio Experimental}}{\text{Valor Teórico}} \right| \cdot 100 \\
 &= \left| \frac{(-133.491852488944) - (-132.92333333)}{-133.491852488944} \right| \cdot 100 \\
 &= \left| \frac{-0.568519156}{-133.491852488944} \right| \cdot 100 \\
 &= 0.425883
 \end{aligned} \tag{7.31}$$

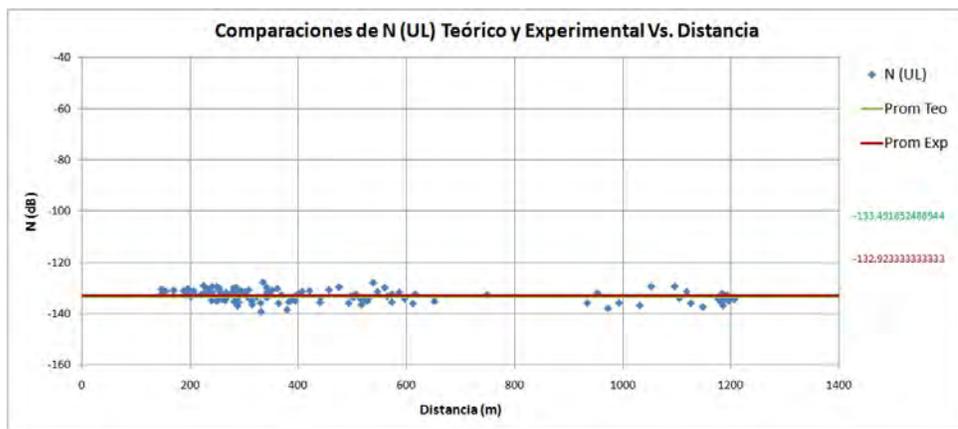


Figura 7.21: Gráfica de la comparación de N Teórico y Experimental usando un diablito, tomando el RSSI del Uplink.

Como se puede ver, el error dado en la fórmula 7.31 es a penas un poco mayor del 0.4%, lo cual indica que los equipos está muy bien calibrados y que las mediciones obtenidas son confiables.

A continuación se hace el análisis de los datos y las comparaciones, haciendo notar que solamente se trabajará con los datos obtenidos por el SUI, es decir, se trabajará solamente con los datos dados en el figura 7.17, ya que del análisis anterior se puede ver que los datos del SUI y de las radio base son muy similares, tomando en cuenta que solamente están defasados por el valor de N.

En la figura 7.22 se puede apreciar que la curva ajustada de los datos tomados a 2.6 m de altura está por arriba de la curva ajustada de los datos tomados a 1.25 m, que es lo que se esperaba obtener.

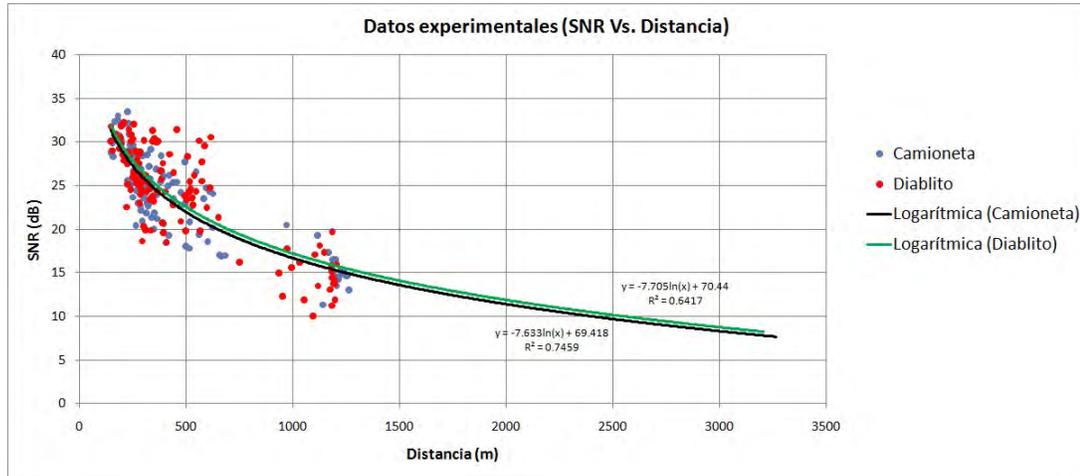


Figura 7.22: Comparación entre las mediciones tomadas a diferentes alturas.

La zona 4 ya no se analizó debido a que la señal era casi nula mucho antes de llegar a esta región, por lo que no se consideró apropiado analizar dicha zona.

7.2. Ajuste de parámetros

El ajuste consiste en la modificación de los parámetros μ_σ , a , b , c , los cuales son variables que dependen del tipo de terreno. El ajuste se realizó haciendo una comparación entre las fórmulas teóricas y las ecuaciones de las curvas ajustadas, tal como se describe a continuación.

De las fórmulas 7.1, 7.2, 7.3 y 7.18 se tiene que:

$$\begin{aligned}
 SNR &= -10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) - A - \mu_\sigma - Cf - Ch \\
 &\quad + G_{rx} + PIRE - N \\
 &= -10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}(d) - A - \mu_\sigma - Cf - Ch \\
 &\quad + G_{rx} + PIRE - N + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}(d_o) \\
 &= -10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}(d) - A - \mu_\sigma - Cf - Ch \\
 &\quad + G_{rx} + PIRE - N + 2 \cdot 10 \cdot \gamma; \quad d > d_o \quad (7.32)
 \end{aligned}$$

La ecuación de la curva ajustada de los datos experimentales está dada por:

$$SNR = -7.63335109 \cdot \ln(x) + 69.41758823 \quad (7.33)$$

Se debe de escribir la ecuación 7.33 en función del logaritmo base 10 para poder comparar dicha ecuación con la ecuación teórica 7.32, para esto utilizaremos el siguiente resultado.

$$\begin{aligned} \ln(x) &= \ln(x) \cdot \left(\frac{\log_{10}(e)}{\log_{10}(e)} \right) \\ &= \frac{\log_{10}(e^{\ln(x)})}{\log_{10}(e)} \\ &= \frac{\log_{10}(x)}{\log_{10}(e)} \end{aligned} \quad (7.34)$$

Reescribiendo la ecuación 7.33 utilizando la ecuación 7.34, queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} SNR &= - \left(\frac{-7.63335109}{\log_{10}(e)} \right) \cdot \log_{10}(x) + 69.41758823 \\ &= -17.57644043 \cdot \log_{10}(x) + 69.41758823 \end{aligned} \quad (7.35)$$

Se puede ver que la fórmula 7.35 es de la forma $A' \cdot \log_{10}(x) + B'$, donde:

$$A' = -17.57644043 \quad (7.36)$$

$$B' = 69.41758823 \quad (7.37)$$

Igualando la ecuación teórica 7.32 con la ecuación experimental 7.35 se tiene:

$$\begin{aligned} A' \cdot \log_{10}(x) + B' &= -10 \cdot \gamma \cdot \log_{10}(d) - A - \mu_\sigma - Cf - Ch \\ &+ G_{rx} + PIRE - N + 2 \cdot 10 \cdot \gamma \quad d > d_o \end{aligned} \quad (7.38)$$

Por lo tanto:

$$A' = -10 \cdot \gamma \quad (7.39)$$

$$B' = -A - \mu_\sigma - Cf - Ch + G_{rx} + PIRE - N + 2 \cdot 10 \cdot \gamma \quad (7.40)$$

Despejando μ_σ de la fórmula 7.40 y sustituyendo en la misma el valor de A' , dado en la fórmula 7.39, se tiene:

$$\mu_\sigma = -A - Cf - Ch + G_{rx} + PIRE - N - 2 \cdot A' - B' \quad (7.41)$$

Sustituyendo los valores de A , Cf , Ch , $PIRE$, N , A' y B' de las fórmulas 7.9, 7.13, 7.14, 7.19, 7.23, 7.36, 7.37 respectivamente en la fórmula 7.41 y sustituyendo el valor de G_{rx} de la tabla 7.1 en la misma, se tiene el siguiente resultado:

$$\begin{aligned} \mu_\sigma &= -(83.26961234) - (1.442172072) - (0) + (10.5) + (37.3) \\ &\quad - (-133.4918525) - 2 \cdot (-17.57644043) - (69.41758823) \\ &= 32.31536071 \end{aligned} \quad (7.42)$$

Ahora se procede a calcular el valor de las variables a , b y c que definen a γ . De las ecuaciones 7.36 y 7.39 se tiene:

$$\begin{aligned} & -10 \cdot \gamma = -17.57644043 \\ \Rightarrow & 10 \cdot \gamma = 17.57644043 \\ \Rightarrow & \gamma = 1.757644043 \\ \Rightarrow & a - b \cdot h_{bs} + \frac{c}{h_{bs}} = 1.757644043 \\ \Rightarrow & a - b \cdot 35 + \frac{c}{35} = 1.757644043 \end{aligned} \quad (7.43)$$

Como se puede ver en la ecuación 7.43, a , b y c pueden tomar múltiples valores, por ello es tendrá que asignarle un valor a dos variables y luego calcular el valor de la tercera variable, sin embargo esta asignación no debe de ser al azar, se deben de cuidar ciertos detalles.

Uno de los detalles a cuidar es que si se quita el offset que tiene la curva experimental con respecto a las curvas teóricas, podemos ver que la curva experimental está por encima de todas las curvas teóricas, tal y como se muestra en la figura 7.23; con esto en mente y viendo que los valores de a , b y c vistos en la tabla 4.1 siguen un patrón, es decir, que los valores de a y b decrecen al pasar del terreno tipo A al B y del B al C, mientras que el valor de c aumenta, llegamos a la conclusión de que los valores de a y b para nuestro terreno estudiado deben de ser menores que los valores de las mismas variables en el terreno tipo C, mientras que el valor de c debe de ser mayor.

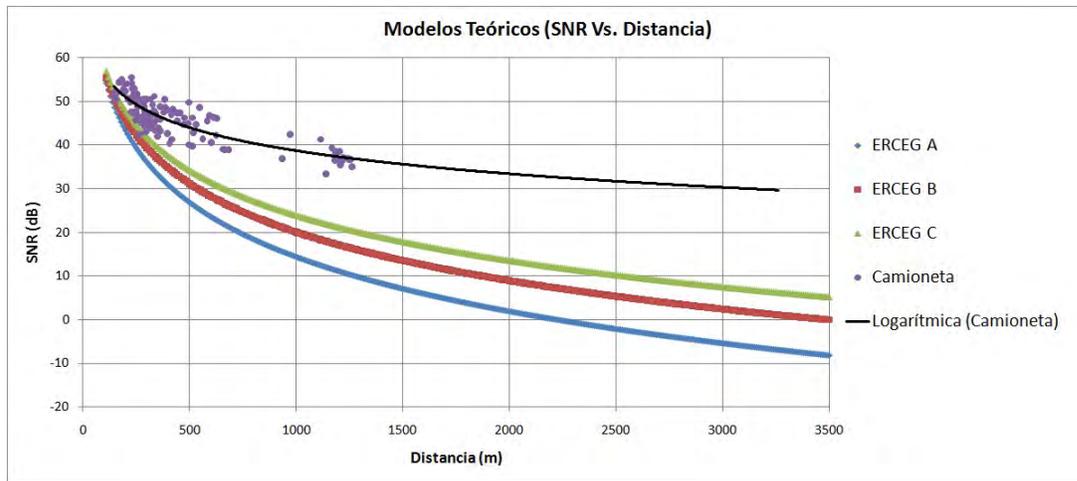


Figura 7.23: Comparación entre los modelos teóricos y el experimental quitando el offset.

Otro de los detalles que se debe de cuidar es el comportamiento de γ que depende de los valores que le asignemos a las variables a , b y c , tomando en cuenta diferentes alturas de la antena de la radio base.

	Terreno tipo A	Terreno tipo B	Terreno tipo C
γ con $h_{bs} = 10m$	5.785	5.645	5.55
γ con $h_{bs} = 35m$	4.6975	4.261071429	3.996428571
γ con $h_{bs} = 80m$	4.1575	3.69375	3.45
Diferencia de 10m a 80m	1.6275	1.95125	2.1

Tabla 7.2: Comportamiento de γ .

Viendo la tabla 7.2 y tomando en cuenta que la curva experimental está por encima

de las curvas de los modelos teóricos, la diferencia de γ considerando las diferentes alturas de la radio base debe de ser mayor que la del terreno tipo C, sin embargo no debe aumentar demasiado.

Así los valores de las variables cuya diferencia de γ nos da 2.356140485 son:

$$a = 1.2$$

$$b = 0.00365915$$

$$c = 24$$

Así la tabla de valores para poder modelar los diferentes tipos de terrenos queda de la siguiente forma:

Parámetros de los modelos	Terreno Cat. A	Terreno Cat. B	Terreno Cat. C	Terreno Nuevo
a	4.6	4.0	3.6	1.2
b (m^{-1})	0.0075	0.0065	0.0050	0.00365915
c (m)	12.6	17.1	20.0	24
μ_σ	10.6	9.6	8.2	32.31536071

Tabla 7.3: Parámetros utilizados para los modelos ERCEG.

El valor de μ_σ aumenta mucho pues debe compensar el offset que presenta la curva experimental con respecto a las curva teóricas (tomando en cuenta el inicio de las curvas).

Capítulo 8

Aplicaciones

En este capítulo solamente veremos como modificar el código del simulador OPNET para poder hacer simulaciones más precisas si se requiere utilizar o trabajar con el terreno estudiado.

Se realizará una pequeña modificación al ajuste de variables presentado en el capítulo anterior para poder hacer la modificación del código en OPNET más sencilla.

8.1. Corrección del ajuste de las variables para su uso en OPNET

En el capítulo anterior se hizo el ajuste de las variables correspondiente para poder hacer un modelo teórico que se asemejara a la realidad, sin embargo una de las variables que se modificó fue μ_σ , que representa la media del shadow fading, sin embargo este valor en sí se usa para complementar el shadow fading, cuyo valor es más complejo y el simulador OPNET lo calcula dependiendo de las células vecinas que se tenga, entre otras variables.

Implementar la nueva categoría de terreno para el modelo ERCEG en simulador OPNET es sencillo, debido a que su código está escrito en C, utiliza variables casi con el mismo nombre de las variables que se usan en las fórmulas teóricas y muchas de las líneas del código están descritas. La parte del código que nos interesa se encuentra

en la función “wimax_phy_power_erceg_pathloss_compute”, la cual se encuentra en el archivo “wimax_phy_support.ex.c” que forma parte del módulo WiMAX del simulador OPNET 16.0.

He aquí la parte del código que nos interesa.

```

/*****
/*****Pathloss computation *****/
/*****
double
wimax_phy_power_erceg_pathloss_compute (double distance,
double lambda, double freq, double mobile_height,
double base_station_height, int terrain_type)
{
double pathloss;
double a_term;
double gamma;
double delta_pl_f, delta_pl_h;
double a, b, c;
static double constant_a_values[3] = {4.6, 4.0, 3.6};
static double constant_b_values[3] = {0.0075, 0.0065, 0.005};
static double constant_c_values[3] = {12.6, 17.1, 20.0};

FIN (wimax_phy_power_erceg_pathloss_compute ());

/* Assign values for a, b, and c, based on the terrain type. */
a = constant_a_values [terrain_type];
b = constant_b_values [terrain_type];
c = constant_c_values [terrain_type];

/* Make sure the BS height is within the range specified by */
/* path loss model. */
if (base_station_height < 10.0)
```

```
base_station_height = 10.0;
else if (base_station_height > 80.0)
base_station_height = 80.0;

/* Similarly, make sure that the SS height is also within the */
/* specified range. */
if (mobile_height < 2.0)
mobile_height = 2.0;
else if (mobile_height > 10.0)
mobile_height = 10.0;

/* Compute the intersect value. */
a_term = 20 * log10 ((WIMAXC_FOUR_PI * 100)/lambda);

/* Compute the pathloss exponent. */
gamma = (a - (b * base_station_height) + (c / base_station_height));

/* Compute pathloss. */
pathloss = a_term + (10 * gamma * log10 (distance/100));

/* Frequency correction terms. */
/* Frequency should be in Mhz for this correction. */
delta_pl_f = 6 * log10 (freq/(2000.0*1e6));

/* Compute the antenna height correction term. */
if (terrain_type == WrlsC_Pathloss_Terrain_C)
{
delta_pl_h = -20.0 * log10 (mobile_height/2.0);
}
else
{
delta_pl_h = -10.8 * log10 (mobile_height/2.0);
```

```

}

/* Apply the frequency and antenna height correction terms. */
pathloss = pathloss + delta_pl_f + delta_pl_h;

FRET (pathloss);
}

```

8.2. Modificación del Código en OPNET

Tomando en cuenta el código en OPNET y lo descrito en la sección anterior, se tuvo que hacer un nuevo ajuste, es decir, para no agregar un nuevo tipo de terreno y hacer una gran modificación al código, se modificarán solamente las variables de un tipo de terreno ya descrito y además el valor de μ_σ no se modificará, se tomará la diferencia del valor de esta variable en el modelo teórico seleccionado y el modelo ajustado que dimo en el capítulo anterior, dicho valor se añadirá al valor de A (a.term en el código) , pues éste solo representa una traslación de la curva y no importa dicho cambio.

En esta ocasión se eligió modificar el terreno tipo C pues nuestra curva está por encima de todas las curvas teóricas dadas por el modelo ERCEG, con esto en cuenta, el nuevo valor de A (a.term en el código) nos queda como:

$$\begin{aligned}
 A &= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d_o}{\lambda} \right) + \mu_\sigma(\text{ajustado}) - \mu_\sigma(\text{teorico}) \\
 &= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d_o}{\lambda} \right) + 32.31536071 - 8.2 \\
 &= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d_o}{\lambda} \right) + 24.11536071
 \end{aligned}$$

Así nuestro código nos queda de la siguiente manera:

```

/*****
/*****Pathloss computation *****/

```

```
/******  
double  
wimax_phy_power_erceg_pathloss_compute (double distance,  
double lambda, double freq, double mobile_height,  
double base_station_height, int terrain_type)  
{  
double pathloss;  
double a_term;  
double gamma;  
double delta_pl_f, delta_pl_h;  
double a, b, c;  
  
/**** Modificación de los parámetro para Terreno tipo C ****/  
/**** Iván Andrade Baruch ****/  
/**** Dr. Víctor Rangel Licea ****/  
/**** UNAM - 2013 ****/  
static double constant_a_values[3] = {4.6, 4.0, 1.2};  
static double constant_b_values[3] = {0.0075, 0.0065, 0.00365915};  
static double constant_c_values[3] = {12.6, 17.1, 24.0};  
/**** Fin de la modificación ****/  
  
FIN (wimax_phy_power_erceg_pathloss_compute ());  
  
/* Assign values for a, b, and c, based on the terrain type. */  
a = constant_a_values [terrain_type];  
b = constant_b_values [terrain_type];  
c = constant_c_values [terrain_type];  
  
/* Make sure the BS height is within the range specified by */  
/* path loss model. */  
if (base_station_height < 10.0)
```

```
base_station_height = 10.0;
else if (base_station_height > 80.0)
base_station_height = 80.0;

/* Similarly, make sure that the SS height is also within the */
/* specified range. */
if (mobile_height < 2.0)
mobile_height = 2.0;
else if (mobile_height > 10.0)
mobile_height = 10.0;

/* Compute the intersect value. */
a_term = 20 * log10 ((WIMAXC_FOUR_PI * 100)/lambda);

/* Compute the pathloss exponent. */
gamma = (a - (b * base_station_height) + (c / base_station_height));

/* Compute pathloss. */
/**** Modificación de los parámetro para A ****/
/**** Iván Andrade Baruch ****/
/**** Dr. Víctor Rangel Licea ****/
/**** UNAM - 2013 ****/

pathloss = a_term + (10 * gamma * log10 (distance/100)) + 24.11536071;

/**** Fin de la modificación ****/

/* Frequency correction terms. */
/* Frequency should be in Mhz for this correction. */
delta_pl_f = 6 * log10 (freq/(2000.0*1e6));
```

```
/* Compute the antenna height correction term. */
if (terrain_type == WrlsC_Pathloss_Terrain_C)
{
delta_pl_h = -20.0 * log10 (mobile_height/2.0);
}
else
{
delta_pl_h = -10.8 * log10 (mobile_height/2.0);
}

/* Apply the frequency and antenna height correction terms. */
pathloss = pathloss + delta_pl_f + delta_pl_h;

FRET (pathloss);
}
```

Capítulo 9

Conclusiones

En este capítulo se presenta un pequeño detalle de las contribuciones de esta tesis, los trabajos futuros o complementarios que pueden derivarse con base en los resultados obtenidos en la tesis y por último se presentan las conclusiones finales.

9.1. Contribución

El trabajo realizado presenta una base de datos con la información y el análisis del terreno que fue objeto de estudio de esta tesis, que es un área del terreno de la Ciudad Universitaria (UNAM).

A lo largo de la tesis se da una amplia descripción de los equipos necesarios dentro de una red WiMAX, se muestra la manera en que se realiza un estudio de propagación y los posibles problemas a los que se puede uno enfrentar.

Se muestra que el terreno analizado es completamente distinto de los 3 tipos de terreno que sugiere el modelo ERCEG, por lo cual podemos incluir nuestro terreno como un nuevo tipo de terreno y gracias al ajuste de las variables presentado se puede añadir a las fórmulas de los modelos existentes.

9.2. Trabajos futuros

Dentro de los modelos teóricos y dentro del modelo experimental no se incluyeron todas las variables que debe de incluir el Shadow Fading, puesto que nuestro estudio no contempla células vecinas que estén transmitiendo; para poder realizar un estudio más completo se debe de contemplar todas las variables, para lo cual podríamos incluir otras células que transmitan información y hacer la comparación con este trabajo.

Realizar el mismo estudio modificando la altura de la Radio Base nos proporcionaría más información para poder hacer un ajuste más exacto en las variables.

En este trabajo se muestra como hacer las modificaciones dentro del simulador OPNET para poder trabajar con un terreno real, sin embargo no se realizaron dichas pruebas, por lo cual convendría hacer el análisis en el simulador OPNET y hacer la comparación con este trabajo.

9.3. Conclusiones finales

Conocer el valor de la pérdida por trayectoria de la señal es de vital importancia para las compañías y para cualquier persona que piense utilizar las señales WiMAX, puesto que de ello depende la zona de cobertura y la velocidad o calidad de servicio que se le puede dar a los usuarios. Un mal estudio de propagación, por ende una mala estimación de la pérdida por trayectoria puede causar pérdidas monetarias muy importantes para las compañías, empresas, etc, pues lo más recomendable es tener la menor cantidad de Antenas cubriendo la totalidad o la mayor parte almenos de los terrenos donde se considere implementar este tipo de red.

En los resultados mostrados para el tipo de terreno analizado se encontró que la señal se degrada de manera más lenta que cualquier tipo de terreno considerado en el modelo ERCEG. El hecho de haber encontrado un tipo de terreno muy diferente de los mostrados por el modelo ERCEG sugiere que existe una gran limitante en los tipos de terrenos considerados actualmente por dicho modelo.

Bibliografía

- [1] 4G Americas. Comprendiendo las diferencias entre 1G, 2G, 3G y 4G. Disponible en:
<http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=406>
- [2] 4G Americas. Focus on international regulations for spectrum management and satellite orbits. Disponible en:
<http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=pressreleasedisplay&pressreleaseid=2993>
- [3] Aguilar Mendoza, Erick Eduardo; Cruz Leon, Genaro. Estudio instrumental de los parámetros QoS para la implementación de aplicaciones VoIP en una red WiMAX/IEEE 802.16-2004. Tesis, UNAM, México D.F., Junio 2009.
- [4] Andrews, J; Ghosh, A; Muhamed, R. Fundamentals of WiMAX - Understanding Broadband Wireless Networking. Prentice Hall, 2007.
- [5] Bansal, Rajeev. 1G to 4G Overview. Disponible en
<http://www.itu-apt.org/ngnrm/rajeevbansal2.pdf>
- [6] Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth Smart Marks. Disponible en:
<https://www.bluetooth.org/en-us/bluetooth-brand/smart-marks-faqs>
- [7] Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth Specification Version 3.0 + HS. 21 de Abril 2009. Disponible en:
https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx?doc_id=174214

-
- [8] Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth Specification Version 4.0. 30 de Junio 2009. Disponible en:
https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=229737
- [9] Covarrubias Ruiz, Julio César. Modelo de propagación para exteriores en la banda de 3.5 GHz. Tesis, IPN, México D.F., 2009.
- [10] Erceg, Vinko; Greenstein, Larry J.; Tjandra, Sony Y.; Parkoff, Seth R.; Gupta, Ajay; Kulic, Boris; Julius, Arthur A.; Bianchi, Renee. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 17, pp. 1205 a 1211, July 1999.
- [11] Erceg, Vinko; et al., Channel Models for Fixed Wireless Applications, IEEE802.16.3c-01/29r4, Broadband Wireless Working Group, IEEE P802.16, 2001.
- [12] IEEE Computer Society. 802.11n - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. 11 de Septiembre 2009. Disponible en:
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11n-2009.pdf>
- [13] IEEE Computer Society. 802.11ad - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band. 28 de Diciembre 2012. Disponible en:
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ad-2012.pdf>
- [14] IEEE Computer Society. 802.11ac - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications, Amd 4: Enhancements for Very High Throughput for operation in bands below 6GHz. Disponible en:
<http://standards.ieee.org/develop/project/802.11ac.html>
- [15] IEEE Computer Society. 802.16-2004 - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. 1 de Octubre 2004. Disponible en:

-
- [16] IEEE Computer Society. 802.16e - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. 2006.
- [17] IEEE Computer Society. 802.16-2009 - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. 29 de Mayo 2009.
- [18] IEEE Computer Society. 802.16m-20011 - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems: Amendment 3: Advanced Air Interface. 6 de Mayo 2011.
- [19] International Telecommunication Union. Introduction to Mobile Cellular Technology. Disponible en:
<http://www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html>
- [20] International Telecommunication Union. What is IMT-2000. 2001-2002, Disponible en:
http://www.itu.int/osg/imt-project/docs/What_is_IMT2000-2.pdf
- [21] Martínez Martínez, Evelio. Evolución de la tecnología celular. Revista NET, Julio 2001.
- [22] Martínez Martínez, Evelio. ABC de la telefonía celular. Revista NET, Septiembre-Octubre 2004.
- [23] Nuaymi, Loutfi. WiMAX - Technology for Broadband Wireless Access. John Wiley & Sons Ltd. 2007
- [24] Ortiz Buenrostro, Luís Manuel. Diseño de técnicas de control de admisión para redes móviles IEEE 802.16e. Maestría en Ciencia e Ingeniería de la Computación, Área: Ing. de Sistemas y Redes Computacionales. UNAM, 2009.
- [25] Redline Communications. AN-100U/X Single Sector Wireless Access Base Station - User Manual. 2007.
- [26] Redline Communications. RedMAX Subscriber Unit Indoors - User Manual. 2010.

- [27] Senarath, Gamini; Tong, Wen; et.al. Multi-hop Relay System Evaluation Methodology (Channel Model and Performance Metric). 2007. Disponible en: http://www.ieee802.org/16/relay/docs/80216j-06_013r3.pdf
- [28] Tanenbaum, Andrew S. Redes de Computadoras. 4ª Ed., PEARSON. México, 2003.
- [29] TELCEL. <http://www.telcel.com/4GLTE/faqs.html>
- [30] Toh, Chai K. Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems. Prentice Hall, Diciembre 2001.
- [31] WIMAX Forum. WiMAX's technology for LOS and NLOS environments. white paper, 2006.

Glosario

AMPS Advanced Mobile Phone System, Sistema de Telefonía Móvil Avanzada.

ARQ Automatic Retransmissions Requests, Solicitud de Repetición Automática.

BE Best Effort, Mejor Esfuerzo.

BFWA Broadband Fixed Wireless Applications, Aplicaciones Inalámbricas Fijas de Banda Ancha.

BPSK Binary Phase Shift Keying, Modulación Binaria por Desplazamiento de Fase.

BS Base Station, Estación Base.

BW Bandwidth, Ancho de Banda.

CDMA Code Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Código.

CID Connection Identifier, Identificador de conexión.

CP Cyclic Prefix, Prefijo Cíclico.

D-AMPS Digital AMPS, Sistema Digital de Telefonía Móvil Avanzada.

DL Downlink, Enlace Descendente o de Bajada.

EDGE Enhanced Data Rates for GSM Evolution, Tasa de Datos Mejorada para la Evolución de GSM.

FDD Frequency Division Duplex, Dúplex por División de Frecuencia.

FDMA Frequency Division Multiple Access), Acceso Múltiple por División de Frecuencia.

FPLMTS Future Public Land Mobile Telecommunication System, Futuros Sistemas Públicos de Telecomunicaciones Móviles Terrestres.

GHz Giga Hertz.

GPRS General Packet Radio Service, Servicio General de Paquetes vía Radio.

GSM Antes Groupe Spécial Mobile y ahora Global System for Mobile communications, Sistema Global para comunicaciones móviles.

Hz Hertz.

IE Information Element, Elemento de Información.

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

IMT International Mobil Telecommunication, Sistema de Telecomunicaciones Móviles Internacionales.

IP Internet Protocol, Procoloco de Internet.

ISO International Standard Organization, Organización Internacional de Estándares.

ITU International Telecommunications Unios, Unión Internacional de Telecomunicaciones.

LLC Link Layer Control, Control de enlace Lógico.

LTE Long Term Evolution, Evolución a Largo Plazo.

MAC Medium Access Contro, Control de Acceso al Medio.

MHz Mega Hertz.

MOU Memorandum of understanding, Memorándum de Entendimiento.

NMTS Nordic Mobile Telephone System, Sistema de Telefonía Móvil Nórdica.

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access), Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.

OSI Open System Interconnection, Interconexión de Sistemas Abierto.

PDU Protocol Data Unit, Unidad de Protocolo de Datos.

PHY Physical, Física (capa).

PIRE Potencia Isotrópica Radiada Efectiva.

PL Path Loss, Pérdida por Trayectoria.

QAM Quadrature Amplitude Modulation, Modulación de Amplitud en Cuadratura.

QoS Quality of Service, Servicio de Calidad.

QPSK Quadrature Phase-Shift Keying, Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.

rtPS Real-time Polling Service, Servicio de Consulta en tiempo Real.

SC Single Carrier, Una sola portadora.

SDU Service Data Unit, Unidad de Servicio de Datos.

SFID Service Flow Identifier, Identificador de Flujo de Servicios.

SMS Short Message Service, Servicio de mensaje Corto.

SNR Signal to Noise Ratio, Relación Señal a ruido.

SS Subscriber Station, Estación suscriptora.

SU-I Subscriber Unit Indoor, Unidad Suscriptora para Interiores.

SU-O Subscriber Unit Outdoor, Unidad Suscriptora para Exteriores.

SUI Stanford University Interim.

TACS Total Access Communications System, sistema de Comunicaciones de Acceso Total.

TDD Time Division Duplex, Dúplex por División de Tiempo.

TDMA Time Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de tiempo.

UGS Unsolicited Grant Service, Servicio de Concesión sin solicitud.

UL Uplink, Enlace ascendente o de subida.

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas.

WirelessHUMAN High-speed Unlicensed Metropolitan Area Networks, Red de Área Metropolitana Inalámbrica de Alta Velocidad sobre bandas sin Licencia.

WMAN Wireless Metropolitan Area Network, Red de Área Metropolitana Inalámbrica.