UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES

CÁLCULO DE CAPACIDAD DE UNA RED FIJA BASADA EN WIMAX IEEE 802.16d

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

REALIZADO POR *Rosell Carolina Barrios Benítez*

PROFESOR GUIA *José Javier Barrios A.*

FECHA *24 de Septiembre de 2007*

CÁLCULO DE CAPACIDAD DE UNA RED FIJA BASADA EN WIMAX IEEE 802.16d

Barrios, Rosell
rosellbarrios@hotmail.com

RESUMEN

WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) es el nombre con el que se conoce a la familia de estándares 802.16, el presente Trabajo Especial de Grado se enfocará en la norma 802.16d, el cual es un estándar inalámbrico aprobado por la IEEE, y avalado por el Foro WIMAX. Ésta tecnología se caracteriza por brindar acceso inalámbrico de banda ancha, con velocidades de hasta 70Mbps, alcance de 50Km aproximadamente y Calidad de Servicio (QoS) en sus aplicaciones de voz y datos.

Para planificar una red basada en dicho estándar es necesario realizar un proceso de dimensionamiento que abarque la cantidad de usuarios que puede soportar la red en un momento determinado y la capacidad que se le pueda brindar a cada uno de ellos. Por tal motivo se plantea, en el presente proyecto, el desarrollo de una Herramienta de Dimensionamiento que calcule la capacidad de una red basada en WIMAX (versión fija), el número máximo de usuarios que soporta y los parámetros relacionados. Para ello se llevará a cabo una extensa investigación bibliográfica, tanto en material impreso como en electrónico, del cual se recopilará la información acorde con los objetivos planteados. Posteriormente se elaborará el análisis correspondiente a dicha información, de donde serán realizados los cálculos necesarios para la obtención de la capacidad. Adicionalmente serán programados dichos cálculos, en el ambiente de desarrollo más apropiado, los cuales conformarán la Herramienta anteriormente mencionada. Como último paso se realizará la simulación de un enlace WIMAX a fin de ejemplificar, al usuario, el comportamiento de dicho enlace. Cabe destacar que resulta importante el estudio de la influencia de la separación entre la estación base y la estación suscriptora, por lo que se realizará dicho estudio a lo largo del desarrollo presente proyecto. **Palabras clave:** Radio Propagación, Modulación, Red, Diseño, WIMAX

ÍNDICE GENERAL

Resumen..... i

Dedicatoria..... ii

Agradecimientos..... iii

Índice General..... iv

Índice de Figuras..... v

Índice de Tablas..... vii

Glosario de Acrónimos..... ix

Introducción 1

Capítulo I 2

Planteamiento del Proyecto..... 2

I.1 Objetivos 3

I.1.1 Objetivo General 3

I.1.2 Objetivos Específicos..... 3

I.2 Justificación..... 3

I.3 Limitaciones y Alcance..... 4

Capítulo II..... 6

Marco Teórico..... 6

Diseño de un Enlace Inalámbrico y cálculo de los parámetros involucrados..... 6

II.1 Potencia Recibida..... 6

II.1.1 Modelos de Propagación..... 9

II.2 Temperatura del ruido..... 16

II.3 Planificación y Dimensionamiento para una red fija basa en WIMAX 18

II.3.1 Arquitectura de una red WIMAX 19

II.3.2 Características de los enlaces: con y sin línea de vista..... 21

II.3.3 Soluciones tecnológicas para los sistemas NLOS 23

Ventajas de OFDM..... 25

Capítulo III 34

Marco Metodológico y Desarrollo..... 34

III.1 Fase I. Investigación Bibliográfica..... 35

III.2 Fase II Análisis de la Información y Cálculos..... 35

III.2.1 El Medio Inalámbrico..... 36

III.2.2 Modulación Digital..... 36

III.2.3 Asignación y Reutilización de frecuencias..... 42

III.2.4 WIMAX y sus Características..... 43

III.2.5 Cálculos..... 46

III.3 Diseño y Simulación..... 55

Capítulo IV 59

Análisis de Resultados 59

IV.1 Herramienta de Dimensionamiento 62

IV.2 Valores Significativos..... 63

Capítulo V..... 64

Conclusiones Y Recomendaciones..... 67

Bibliografía..... 71

Apéndice A..... 73

Apéndice B. Código Fuente de la Herramienta..... 95

Anexo A. 146

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Escenario de Propagación que ilustra el Modelo Xia 14

Figura 2. Diagrama de referencia de un sistema de Internet inalámbrica fija de banda ancha..... 20

Figura 3. Propagación con Línea de Vista..... 22

Figura 4. Propagación sin Línea de Vista..... 22

Figura 5. Simple portadora y OFDM..... 24

Figura 6. Comparación de una señal recibida con una simple portadora enviando la información en serie y con OFDM 25

Figura 7. Subcanalización..... 26

Figura 8. Radio relativo de la celda para modulación adaptativa y los diferentes valores de la SNR para cada modulación..... 28

Figura 9. Diagrama representativo de separación de subcanales en una celda..... 32

Figura 10. Ejemplos de uso de canales utilizando antenas de 90 grados..... 33

Figura 11. Fases de desarrollo del Trabajo Especial de Grado..... 35

Figura 12. Modulación en Frecuencia FSK..... 38

Figura 13. Modulación Binaria por Fase BPSK..... 39

Figura 14. Formación de una agrupación de 6 celdas..... 42

Figura 15. Ejemplo ultima milla WIMAX..... 43

Figura 16. Diagrama de flujo del proceso de planificación de capacidad..... 56

Figura 17. Ejemplo de los Resultados de la Herramienta para un caso de estudio..... 60

Figura 18. Pantalla de Presentación de la Herramienta de Cálculo..... 74

Figura 19. Modulo Transmisor..... 75

Figura 20. Modulo Receptor..... 76

Figura 21. Modulo Propagación..... 77

Figura 22. Selección de Entornos con Obstáculos..... 79

Figura 23. Selección de Entornos Urbanos..... 80

Figura 24. Selección de los Modelos Cost231-Walfisch-Ikegami y Xia..... 81

Figura 25. Selección del Modelo Xia..... 82

Figura 26. Resultados de los Modelos de Propagación..... 83

Figura 27. Módulo de Resultados..... 84

Figura 28. Selección de la Modulación..... 86

Figura 29. Probabilidad de Error de QPSK Teórica..... 87

Figura 30. Probabilidad de Error de 16-QAM Teórica..... 87

Figura 31. Probabilidad de Error de 32-QAM Teórica..... 88

Figura 32. Probabilidad de Error de 64-QAM Teórica..... 88

Figura 33. Tasa Binaria – Selección de la Capa fisica a usar..... 89

Figura 34. Número de subcanales en el canal de subida y en el de bajada..... 89

Figura 35. Reporte de Resultados arrojado por el programa..... 90

Figura 36. Módulo Simulación – Características del Terreno..... 91

Figura 37. Módulo Simulación – Perfil del Enlace..... 92

Figura 38. Módulo Simulación – Vista aérea del Enlace..... 92

Figura 39. Módulo Simulación – Radio de Propagación y Threshold..... 93

Figura 40. Módulo Simulación – Foto Satelital del Terreno..... 93

Figura 41. Módulo Simulación – Radio de Cobertura en Fotografia satelital del terreno... 94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Codificación de canal obligatoria en función del tipo de modulación..... 30

Tabla 2. Resumen de la Modulación Digital..... 41

Tabla 3. Resumen de características de WIMAX..... 45

Tabla 4. Comparación de Resultados de Modelos de Propagación 1 63

Tabla 5. Comparación de Resultados de Modelos de Propagación 2 64

Tabla 6. Resumen de resultados de los valores de SNR para cada modulación..... 66

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

B

BLER	Block Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BWA	Bandwidth Wireless Acesss

C

CBR	Constant Bit Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CPE	Customer Premise Equipment
CRC	Cyclic Redundancy Check

D

dB	Decibeles
DL	Down Link

E

EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
ETSI	European Telecommunications Standards Institute

F

FBWA	Fixed Broadband Wireless Access
FDD	Frequency Division Duplex
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction

G

GoS	Grade of Service
GPRS	General Packet Radio Service

I

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISI	Inter-Symbol Interference

L

LA	Location Area
LAN	Local Area Network
LOS	Line Of Sight

M

MAC	Medium Access Control

MAN	Metropolitan Access Network
MAU	Minimum Allocation Unit
MP	Multi Punto
MPMP	Multi Punto a Multi Punto
MS	Mobile Station

O

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access

P

PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
PMP	Punto a Multi Punto
PP	Punto a Punto
PCCCH	Packet Common Control Channel
PCH	Paging Channel
PMP	Punto Multi Punto
PSTN	Public Switched Telephone Network
PDN	Public Data Network
PS	Packet Switched

Q

QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying

R

RF	Radio Frecuencia
RNC	Radio Network Controller
Rx	Recepción/Receptor

S

SC	Single Carrier
SDCCH	Stand-alone Dedicated Control Channel
SDMA	Spatial Division Multiple Access
SDU	Service Data Unit
SIFS	Short Interframe Spacing
SIM	Subscriber Identity Module
SGSN	Serving GPRS Support Node
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
SS	Subscriber Station
STC	Space Time Coding

T

TDM	Time Division Multiplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TE	Terminal Equipment
Tx	Transmisión/Transmisor

U

UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UL	Up Link

V

VoIP	Voice over IP

W

WCDMA	Wideband CDMA
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless LAN

INTRODUCCIÓN

El estándar IEEE 802.16 conocido como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) define una red Metropolitana de Banda Ancha Inalámbrica presentándose así como una alternativa a las conexiones cableadas tradicionales de Banda Ancha tales como xDSL. Ésta tecnología va a permitir velocidades de hasta 70Mbps, dando cobertura a extensas áreas geográficas, lo cual permite concebirla como un complemento a las redes inalámbricas existentes, WIFI. Es por ésta razón que al momento de planificar un sistema basado en WiMAX surge la duda acerca de cuál es el número máximo de clientes que puede soportar la estación base y cuál es la capacidad máxima que se puede ofrecer a cada uno de ellos.

Por tal motivo se ha planteado como objetivo fundamental del presente Trabajo Especial de Grado el Cálculo de la Capacidad de una red WIMAX. A continuación se describirá la estructura a seguir para dar cumplimiento a tal objetivo:

Primer Capítulo: contiene el planteamiento del proyecto el cual describe los objetivos y la razón que justifica al mismo. Segundo Capítulo: desarrolla el marco teórico en donde se puede encontrar toda la teoría en la cual se basan los cálculos hechos a lo largo del Trabajo Especial de Grado. Tercer Capítulo: muestra la metodología y desarrollo, así mismo explica las actividades realizadas para dar cumplimiento a los objetivos planteados. Cuarto Capítulo: presenta los resultados obtenidos de las actividades realizadas y el análisis de los mismos. Y por último, quinto Capítulo: describe las conclusiones y recomendaciones originadas de los resultados obtenidos. Dicho lo anterior se le invita a disfrutar del presente Documento en donde encontrará información variada y balanceada acerca de la tecnología WIMAX IEEE 802.16d.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

WiMAX es la respuesta de la industria de las comunicaciones inalámbricas para el acceso banda ancha que integra aplicaciones de voz y datos. Basado en el estándar IEEE 802.16d permite aplicaciones fijas y móviles en bandas con y sin licencia. Esta tecnología fue estandarizada y desarrollada por el grupo de trabajo *IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*, con una topología Punto a Multipunto o en Malla. En términos generales WiMAX puede tener un alcance de unos 50 Km con tasas promedios de unos 70 Mbps, y está estandarizado para diferentes frecuencias que cubren la banda desde 2 a 66 GHz. Debido a esto, diversos perfiles de usuarios se han definido para clientes residenciales y corporativos, quienes usarán la capacidad del enlace de subida bajo un esquema TDMA con calidad de servicios. Sin embargo, al momento de planificar un sistema basado en WiMAX surge la interrogante sobre el número máximo de clientes que puede soportar la estación base y cual es la capacidad máxima que se puede ofrecer a cada uno de ellos.

La respuesta a estas preguntas es fundamental para la planificación de redes, en este trabajo se tratará de dar una respuesta a tales interrogantes basadas en una red WiMAX fijo usando las especificaciones de equipos certificados en la banda 3.4-3.6 GHz.

I.1 OBJETIVOS

I.1.1 Objetivo General

Determinar la capacidad de una red fija, basada en el estándar de transmisión inalámbrica WIMAX IEEE 802.16d.

I.1.2 Objetivos Específicos

- Calcular la capacidad de los enlaces de subida y bajada de una estación base certificada
- Estudiar la influencia de la separación entre los clientes y la estación base.
- Diseñar una insterfaz amigable con el usuario que le permita realizar el cálculo de capacidad de una red WIMAX, así como la realización de la simulación de un enlace WIMAX.

I.2 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo del sector de telecomunicaciones ha estado enmarcado por grandes cambios tecnológicos, en la última década, pasando por la digitalización hasta la conmutación de paquetes entre otros. Estos desarrollos han permitido el uso más eficiente de la infraestructura de redes y el desarrollo de aplicaciones y contenido enriquecido, los cuales demandan más ancho de banda de tal forma que el usuario final puede tener acceso a estas nuevas aplicaciones y contenidos con menos tiempos de descarga y costos más apropiados.

Entre los cambios tecnológicos se encuentra la implementación de la banda ancha para el acceso a Internet, que le reporta al usuario final grandes beneficios como el de menores tiempos de descarga para contenidos más pesados. De éste modo se desarrolló la banda ancha inalámbrica, que cuenta con un servicio que asegura mejores niveles de calidad y, además de ofrecer los beneficios anteriormente mencionados, posee la ventaja de llevar acceso a internet a aquellos lugares donde la implementación de una opción cableada no sea viable económicamente.

Por tales motivos se justifica la realización de el presente Trabajo especial de Grado que contempla el desarrollo de una herramienta, económicamente factible, que permita conocer la información básica del dimensionamiento de una red de acceso de banda ancha inalámbrica como parte de su proceso de planificación para su posterior implementación y puesta en marcha.

I.3 LIMITACIONES Y ALCANCE

Resulta necesario, en el diseño de una red de telecomunicaciones, realizar una serie de cálculos de parámetros tales como capacidad máxima, velocidad, cobertura, entre otros. Ese es el objetivo fundamental del presente trabajo, realizar los cálculos relacionados con cantidad de usuarios y tasa máxima de transferencia para el diseño una red fija basada en el estándar WIMAX IEEE 802.16d.

En contraste se tiene como principal limitación la falta de acceso a datos, en tiempo real, de los enlaces WIMAX, por lo que los datos a utilizar en el proyecto serán teóricos. Además se deberá considerar, para el análisis, cálculo y simulación del enlace, que siempre hay línea de vista entre la estación base y las estaciones de usuarios y que la altura de la

antena no influye sobre SNR. La densidad de viviendas por Km^2 se estimará de acuerdo a ciertos valores de referencias para áreas urbanas.

El presente trabajo hará un análisis, de los factores capacidad/tasa de transmisión que intervienen en el enlace y transmisión de redes fijas basadas en el estándar IEEE 802.16d, con el fin de tratar de responder, con la mayor exactitud posible, las diversas interrogantes que surgen sobre el número máximo de clientes que puede soportar la estación base y cual es la capacidad máxima que se puede ofrecer a cada uno de ellos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

DISEÑO DE UN ENLACE INALÁMBRICO Y CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS INVOLUCRADOS

Un enlace o comunicación por radio es factible si se dan las condiciones mínimas para que el receptor Rx pueda captar el mensaje que envía el transmisor Tx. La condición fundamental para que un enlace pueda establecerse es que el nivel de la señal sea superior al del ruido. En este sentido surge la relación señal a ruido S/N (SNR). A continuación se describirán, brevemente, algunos de los conceptos fundamentales que han sido utilizados para determinar los parámetros que intervienen en el cálculo de la capacidad de los sistemas digitales.

II.1 POTENCIA RECIBIDA

El modelo de propagación en el espacio libre predice que la potencia recibida decrece a medida que la separación entre las antenas transmisora y receptora aumenta, esto implica que la potencia recibida decae con la distancia a medida de 20dB/década (Martín,1978).

La potencia recibida por una antena de área física real Ar y área efectiva de apertura Ae en metros cuadrados viene dada por:

$$Pr = \frac{P_t G_t Ae}{4\pi d^2} \quad (1)$$

Donde:

d es la distancia

Pt es la potencia transmitida

Pr es la potencia recibida

G_t es la ganancia de la antena transmisora

Ae es el área efectiva de la antena receptora.

De la ecuación (1) se tiene que la potencia recibida en una estación terrena solo depende de la potencia irradiada por la antena transmisora, de la distancia d y del área efectiva.

Se puede observar la relación fundamental entre la ganancia de la antena y su área efectiva por medio de la siguiente ecuación:

$$G_r = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \qquad (2)$$

Despejando A_e y reemplazando en la ecuación (1) se tiene que:

$$P_r(d) = P_t\, G_t\, G_r \left(\frac{\lambda}{(4\pi d)^2}\right)^2 \qquad (3)$$

La ecuación (3) corresponde a la ecuación de Friis (Martín,1978). Además de dicha ecuación se tiene que los términos encerrados entre paréntesis corresponden al inverso de las pérdidas debido a la dispersión de la energía de la onda a través de su viaje. Se representa por la letra L_p y se denomina pérdidas por trayectoria en el espacio libre.

$$L_p = \frac{(4\pi d)^2}{(\lambda)^2} \qquad (4)$$

$$L_p\,[dB] = 20\mathrm{Log}\, d + 20\mathrm{Log}\, f + 92.5_{dB}$$

Donde f es la frecuencia en GHz y 92.5_{dB} es un valor constante que proviene de la expresión 4π10^12/c (c es la velocidad de la luz).

Ahora bien, analizando las ecuaciones (3) y (4) surge un nuevo concepto que permite rescribir la potencia recibida, ese concepto es PIRE "Potencia de Radiación Isotrópica Efectiva" de la antena transmisora y se obtiene multiplicando la potencia transmitida por la ganancia de la antena transmisora, esto es:

$$PIRE = P_t G_t \qquad (5)$$

Con lo anterior se puede rescribir la ecuación (3) de la siguiente manera:

$$P_r = \frac{PIRE\, G_r}{L_p} \qquad (6)$$

A veces resulta conveniente expresar la potencia en escala logarítmica respecto de un valor dado. Normalmente se expresa en dB de Watio (dBW) o en dB de miliWatio (dBm).

Por ejemplo:

P(dBm)= 10Log$_{10}$(Potencia/1mW)

y una potencia de 10 W serían 10 dBW o 40 dBm. Luego la potencia recibida en términos de decibeles queda de la siguiente forma:

$$P_r = PIRE + G_r - L_p \ \ [dBW] \quad (7)$$

Donde:
$PIRE = 10Log_{10}(P_t G_t)$ [dBW]
$G_r = 10Log_{10}(4\pi A_e / \lambda^2)$ [dBi]
$L_p = 20\, Log_{10}(4\pi d / \lambda)$ [dB]

Hasta el momento se ha estudiado un caso ideal donde no existen pérdidas adicionales en el enlace. En la práctica se deben tomar en cuenta otros factores producto de pérdidas en la atmósfera, éstos factores serán consecuencia de, por ejemplo, lluvia y pérdidas en los equipos de transmisión-recepción, con lo que al adicionarlos la ecuación (7) queda de la siguiente forma:

$$P_r = PIRE + G_r - L_p - L_a - L_{ta} \quad [dBW] \qquad (8)$$

Donde L_a son pérdidas por atenuación en la atmósfera, la L_{ta} y L_{ra} son las pérdidas asociadas con la antena transmisora y receptora respectivamente.

Para efectos de la presente investigación se tomarán en cuenta las pérdidas totales en los terminales del transmisor (L_{TT}(dB)), las pérdidas por penetración en interiores (L_{INT}(dB)) y las pérdidas totales en los terminales del receptor (L_{TR}(dB)), con lo cual la ecuación (7) queda de la siguiente manera:

$$P_r(dBW) = P_t - L_{TT} + G_t + G_r - L_p - L_{INT} - L_{TR} \quad [dBW] \quad (9)$$

Nota: el valor de las pérdidas básicas, o pérdidas de propagación varía dependiendo del Modelo de Propagación a utilizar en los cálculos. A continuación se describirán los modelos de interés en la presente investigación.

II.1.2 Modelos de Propagación

Un Modelo de Propagación es la representación de las características de radio de un ambiente determinado mediante el uso de expresiones matemáticas, diversos tipos de diagramas y algoritmos, adicionalmente predicen la perdida por trayectoria que una señal de radiofrecuencia (RF) pueda tener entre una estación base y un receptor sea móvil o fijo.

Su desempeño se mide por la veracidad de los resultados en comparación con medidas de campo reales.

Éstos modelos pueden ser clasificados en Empíricos o Estadísticos, Teóricos o Determinísticos y Semi-empíricos que representan una combinación de las dos primeras clasificaciones. Es importante destacar que la diferencia fundamental entre las clasificaciones de los modelos de propagación radica en que los modelos Empíricos se basan en mediciones realizadas en ambientes de propagación prácticos y los modelos Teóricos se basan en los principios de propagación de ondas de radio. (García, 2000).

La gran ventaja del uso de éstos modelados de canales de radio es conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores, y así poder hacer una estimación acerca de la capacidad, necesidad y costos de los equipos requeridos, es decir, las especificaciones técnicas y costos de los equipos a usar.

Por último cabe destacar que la aplicabilidad de un modelo depende de las especificaciones que este mismo requiera tal como son: el tipo de terreno (montañoso, ondulado o cuasi liso), las características del ambiente de propagación (área urbana, suburbana, abierta), características de la atmósfera (índice de refraccion, intensidad de las lluvias), propiedades eléctricas del suelo (conductividad terrestre), tipo del material de las construcciones urbanas etc. (García, 2000).

A continuación se describirán los modelos de propagación de mayor interés para el presente Trabajo Especial de Grado.

II.1.2.1 Modelo Empírico Okumura-Hata

Éste es uno de los modelos de predicción más usados en Macrocélulas y consiste en trazas curvas medias para el *Path Loss* o Pérdidas por Trayecto basados en una extensa base de datos empíricos recolectados en la Ciudad de Tokio, Japón. Posteriormente Hata deriva fórmulas empíricas a partir de los datos recolectados por Okumura que hoy son llamadas Ecuaciones de Hata. Las ecuaciones fueron formuladas considerando tres tipos de escenarios: Urbano, Suburbano y Rural. (Vanderlei, 2002).

A continuación se describirán las ecuaciones para cada uno de los escenarios planteados en éste modelo.

Escenario Urbano:

$$PL_{HataTU}(dB) = 69.55 + 26.16\log_{10}(fc) - 13.82\log_{10}(h_{BS}) - a(h_{MS}) + [44.9 - 6.5582\log_{10}(h_{BS})]\log_{10}(d) \quad (10)$$

Donde:

fc = frecuencia de la portadora en MHz

h_{BS} = Altura de la estación base en metros

h_{MS} = Altura de la estación móvil en metros

d = distancia entre la estación base y la estación móvil en Kilómetros

$a(h_{MS})$ = factor de corrección para ciudades de pequeñas a medianas densidades.

$$a(h_{MS}) = [1.1\log_{10}(fc) - 0.7]\,h_{MS} - [1.56\log_{10}(fc) - 0.8] \quad (11)$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_{MS}) = \begin{cases} 8.29[\log_{10}(1.54h_{MS})]^2 - 1.1 & \text{si } fc \leq 200MHz \quad (12) \\ 3.2[\log_{10}(11.75h_{MS})]^2 - 4.97 & \text{si } fc \geq 400MHz \quad (13) \end{cases}$$

ESCENARIO SUBURBANO:

$$PL_{HataTS}(dB) = PL_{HataTU}(dB) - 2[\log_{10}(fc/28)]^2 - 5.4 \qquad (14)$$

ESCENARIO RURAL:

$$PL_{HataRU}(dB) = PL_{HataTU}(dB) - 4.78[\log_{10}(fc)]^2 + 18.33\log_{10}(fc) - 40.94 \qquad (15)$$

Donde:

fc: debe estar entre 150MHz y 1500MHz

h_{BS}: debe estar entre 30m y 200m

h_{MS}: debe estar entre 1m y 10m

d: debe estar entre 1Km y 20Km

Una de las desventajas de éste modelo es la limitación en cuanto a las frecuencias permitidas, pues no cumple con los requerimientos de los sistemas celulares de tercera generación que utilizan frecuencias de propagación entre 1.8GHz y 2GHz y mucho menos con un sistema WIMAX que trabaja en frecuencias desde 2.5GHz hasta 5.8GHz, ya que Okumura-Hata fue modelado en los años 80's y por tal motivo las frecuencias contempladas en él son alrededor de los 1500MHz. (Vanderlei, 2002).

Otra característica del Modelo Okumura-Hata es que no prevé las situaciones sin línea de vista y fija las alturas de las estaciones base a partir de los 30m (la altura se refiere a la altura de construcción o de la torre, no se refiere a la altura sobre el nivel del mar) lo cual restringe valores por debajo de los 30m.

II.1.2.2 Modelo Cost231-Hata

El Modelo Cost231 es una extensión del Modelo Hata para el uso de frecuencias entre 1500MHz a 2000MHz y está basado en la propuesta de Mogensen. Los límites para éste modelo son:

fc: debe estar entre 1500MHz y 2000MHz

h_{BS}: debe estar entre 30m y 200m

h_{MS}: debe estar entre 1m y 10m

d: debe estar entre 1Km y 20Km

El Modelo de *Path Loss* Cost231-Hata viene dado por la siguiente ecuación:

$$PL_{Cost231Hata}(dB) = A + B[\log_{10}(d)] + C \qquad (16)$$

Donde:

$A = 46.3 - 33.9[\log_{10}(fc)] + 13.82\log_{10}(h_{BS}) - a(h_{MS})$ (17)

$B = 44.9 - 6.55[\log_{10}(h_{BS})]$ (18)

C= 0 si se trata de un ambiente o áreas con moderada densidad de árboles

C=3 si se trata de ambientes Urbanos

II.1.2.3 Modelo analítico simplificado para ambiente Urbano y Suburbano de Xia

El modelo analítico Xia fue creado con el objeto de obtener una respuesta genérica en la predicción del *Path Loss* en ambientes Urbanos Y Suburbanos. Los modelo empíricos más conocidos antes de la publicación de éste modelo tenían serias problemas provenientes de los resultados obtenidos en mediciones de áreas específicas con limitaciones tanto frecuencia como de alturas de antenas lo cual acarrea dificultades en la adaptación de los sistemas actuales. Debido a esto, el modelo Xia contempla tres procesos de propagación a

los que considera los más importantes en la radiopropagación bajo ambientes Urbanos y Suburbanos. Estos procesos son:

- Pérdidas de propagación en el Espacio Libre
- Pérdidas adicional por múltiple difracción sobre el nivel de los tejados: L_{msd}
- Pérdida de altura media de los edificios: L_{lts}

Las Pérdidas por espacio libre son muy conocidas y vienen dadas por la ecuación (4) expuesta al principio del presente capítulo. De acuerdo con el análisis Xia, las pérdidas por propagación o el *Path Loss* total puede ser expresado como la suma de los tres procesos, de la siguiente manera: $PL_{Xia}(dB) = L_p + L_{msd} + L_{lts}$ (19)

A continuación se muestra una figura que ilustra los tres procesos identificados por Xia, el camino de propagación, así como los parámetros geométricos involucrados.

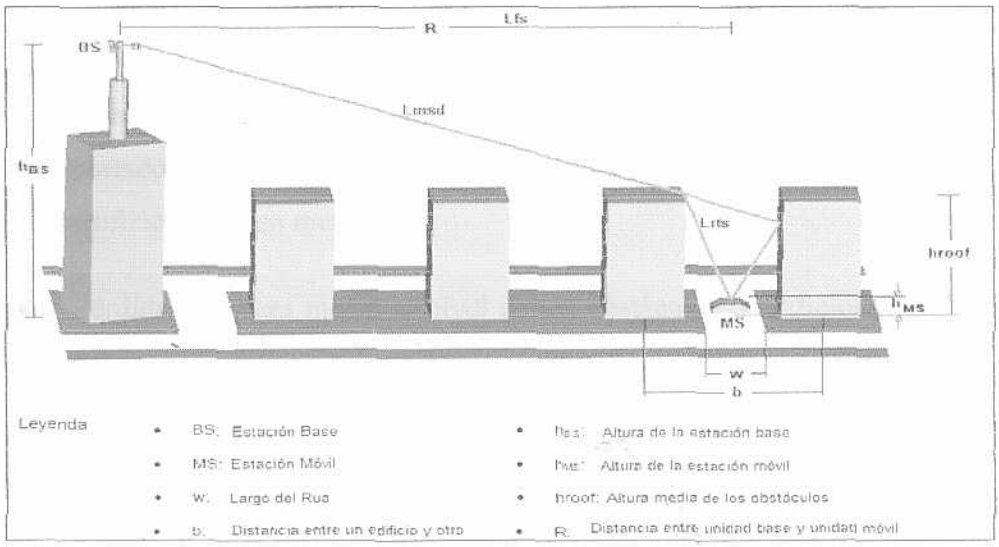


Figura 1. Escenario de Propagación que ilustra el Modelo Xia.
Fuente: Vanderlei, 2002

El medio está dividido en tres situaciones: antena de estación base próxima a la altura de los obstáculos, antena de base por encima de la altura de los obstáculos y antenas de estación base por debajo de la altura de los obstáculos (Vanderlei, 2002). Para cada caso se mostrará una expresión simplificada.

- Pérdidas de propagación en el espacio libre. Y viene dado por la siguiente ecuación:

$$PL_{XIA\,(dB)} = 40\log_{10}(D) + 30\log_{10}(f) + 49dB \quad (20)$$

Donde:

D: distancia del enlace. Viene dada en Km

F: frecuencia de la portadora. Viene dada en MHz

- Pérdidas adicionales por difracción múltiples en el nivel superior a los tejados. Y viene dado por la siguiente ecuación:

$$PL_{XIA\,(dB)} = 38\log_{10}(D) - 18\log_{10}(h_{BS} - hroof) + 21\log_{10}(f) + 81.5dB \quad (21)$$

Donde: D es la distancia del enlace. Viene dada en Km. F es la frecuencia de la portadora. Viene dada en MHz y *hroof* es la altura media de los obstáculos o edificios dada en metros.

- Pérdida de altura media al nivel de los obstáculos o edificios (rua), que viene dada`por la siguiente expresión:

$$PL_{XIA\,(dB)} = 40\log_{10}(D) + 40\log_{10}(f) + 35dB \quad (22)$$

Donde: D es la distancia del enlace en Km y F es la frecuencia de la portadora. en MHz (Vanderlei, 2002).

II.1.2.4 Modelo Cost231-Walfisch-Ikegami

El Modelo Cost231-Walfisch-Ikegami posee las mismas ventajas que el modelo Xia en cuanto a la flexibilidad de los parámetros de entrada con la diferencia de que el modelo Cost231-Walfisch es el único capaz de distinguir entre propagación con línea de vista y sin línea de vista; puede ser usado para frecuencias de 2GHz, limita la distancia de trabajo desde 20m hasta 5Km y la predicción de las pérdidas viene expresado por la siguiente ecuación:

$$PL_{COST231\text{-}WI\,(dB)} = 26\log_{10}(D) + 20\log_{10}(f) + 42.6dB, \quad \text{si } d \geq 0.02Km \quad (23)$$

D es la distancia en Km y F la frecuencia en MHz. (Vanderlei, 2002).

II.2 Temperatura del ruido

En una transmisión real existen varias causas que ocasionan pérdida o atenuación de la señal como es el caso de la absorción y dispersión cuyo efecto en la señal puede ser contrarestado con amplificación.

Para poder comprobar la capacidad de transporte de información de un enlace es necesario estudiar la relación señal a ruido la cual, además de determinar la efectividad del enlace, está estrechamente relacionada con la temperatura del ruido; dicha temperatura es la medida de potencia del ruido térmico que un equipo activo o pasivo genera en un sistema de recepción. El ruido térmico se genera del movimiento aleatorio de los electrones, a mayor temperatura los electrones se mueven con mayor velocidad provocando que se eleve la temperatura del ruido. (Tomasi, 1987).

La potencia del ruido térmico afectando a un rango de frecuencias es proporcional al ancho de banda y a la temperatura absoluta de la siguiente manera:

$$P_n = KT_nB \qquad (24)$$

En donde P_n es la potencia de ruido de la fuente, K es la constante de Boltzmann (K= 1.38e-23J/K = -228.6dBW/K/Hz), T_n es la temperatura de ruido de la fuente (en grados Kelvin) y B es el ancho de banda en Hz.

Si sólo el ruido térmico fuera la única forma de ruido afectando a la señal, la capacidad máxima de transporte de información será la dada por la Ley de Shannon como se muestra a continuación:

$$C = 2B\log_2(1 + P_r/P_n) \ \text{[Bit/seg]} \qquad (25)$$

La relación señal a ruido esta dada por la siguiente ecuación:

$$SNR = P_r/P_n \qquad (26)$$

Por tanto se define la relación señal a ruido (*en inglés signal to noise ratio o SNR*) como el cociente entre la potencia de señal y la potencia de ruido. Normalmente se expresa en escala logarítmica (decibelios o dBs):

$$SNR(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{\text{Potencia de Señal}}{\text{Potencia de Ruido}}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{V_{x,rms}}{V_{n,rms}}\right) \qquad (27)$$

Donde Vx,rms^2 y Vn,rms^2 son los valores cuadráticos medios de señal y ruido referidos a una misma impedancia (por ejemplo a la impedancia normalizada de 1 Ω). (Meyer, 1984).

El ruido en el equipamiento receptor se calculará como:

$$N_{RX}(dBm) = -174 + NF - 10 * log_{10}(BW_{RX}) \quad (28)$$

con NF(dB) es el factor de ruido del receptor y BWRX(Hz) el ancho de banda de recepción. A partir de los valores calculados anteriormente se podrá obtener la relación señal a ruido en cada punto como:

$$SNR(dB) = P_R - N_{RX} \quad (29)$$

II.3 Planificación y Dimensionamiento para una red fija basada en WIMAX IEEE 802.16d

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) es una tecnología inalámbrica basada en el estándar 802.16. En una primera versión del estándar, se hacía referencia únicamente a sistemas que funcionaban en bandas entre 10 y 66 GHz, extendiéndose posteriormente en la versión 802.16-2004 a sistemas en bandas de frecuencias inferiores, entre 2 y 11 GHz. WiMAX hace uso de estas bandas, consiguiendo tener un funcionamiento óptimo tanto en condiciones de visión directa como en presencia de obstáculos, y siendo capaz de conseguir alcances de hasta 50km y velocidades de hasta 70Mbps, gracias a la utilización de capas físicas basadas en **OFDM** (Multiplexación por división de frecuenta ortogonal), tamaños de canal flexibles dependientes de la banda de funcionamiento, modulación adaptativa con esquemas **BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM** y duplexión tanto en tiempo como en frecuencia.

A continuación se describirán brevemente algunos de los aspectos más importantes de WIMAX IEEE 802.16d que serán utilizados para la determinación de los parámetros que intervienen en el cálculo de la capacidad de una red fija basada en dicha tecnología.

II.3.1 ARQUITECTURA DE UNA RED WIMAX

La arquitectura de la Red WiMAX está constituida por 2 bloques principales, la estación base, comúnmente llamada bajo el acrónimo BS (*Base Station*), y el receptor WIMAX utilizado por los usuarios. Este último generalmente es denominado bajo la sigla CPE (*Customer Premise Equipment*). Se consideran sólo estos bloques ya que los estándares 802.16 no especifican alguna tecnología en especial para la conexión con el núcleo de la red, no es parte del sistema WiMAX.

II.3.1.1 ESTACIÓN BASE WIMAX

La estación base WiMAX corresponde a los equipos, que generalmente son ubicados en casetas, con los resguardos de clima y energía necesarios en la mayoría de los equipos de telecomunicaciones. Una estación base teóricamente puede cubrir hasta 50 kilómetros, pero en la práctica se consideran alrededor de 10 kilómetros.

Así como las antenas de las estaciones base de las redes celulares, las antenas WiMAX pueden ser omnidireccionales o direccionales.

II.3.1.2 EL CPE WIMAX

Un *Customer Premise Equipment* (CPE) es un equipo que puede tener por separado la antena, venir todo integrado en una sola caja o ser un tarjeta PCMCIA que se ocupe en los laptops. El acceso a una estación base WiMAX es como acceder a una red WiFi, pero con una cobertura y transferencia de datos mayor.

II.3.1.3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Los sistemas de acceso a banda ancha inalámbrica generalmente usan arquitecturas del tipo multipunto (MP). La arquitectura MP incluye punto-multipunto (PMP) y *mesh* (Multi Punto a Multi Punto. Éstos sistemas contemplan estaciones base, estaciones del suscriptor (SSs: *Subscriber Station*), terminales (TE), equipos del núcleo de la red, enlaces entre celdas, estaciones repetidoras (RSs; *Repeater Stations*), y posiblemente otros equipos. En la siguiente figura se mostrará un diagrama que ejemplifica éste tipo de sistemas de Banda Ancha Inalámbrica. Cabe destacar que dichos sistemas deben contener al menos una BS y un cierto número de SSs. (Muñóz, 2007).

Para la interconexión entre estaciones base se puede utilizar enlaces inalámbricos, de fibra o par de cobre.

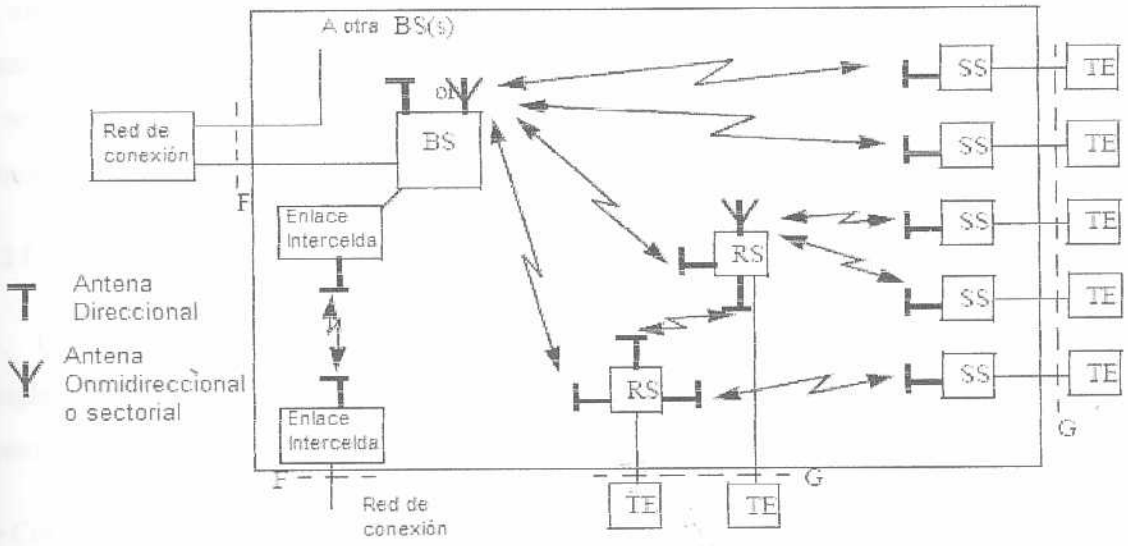


Figura 2. Diagrama de referencia de un sistema de Internet inalámbrica fija de banda ancha.
Fuente: Muñoz, 2007

En un sistema PMP, los RSs son usados para mejorar la cobertura en lugares donde no se tiene línea de vista (LOS), dentro del área normal de cobertura o alternativamente para extender la cobertura de una BS en particular. Una estación repetidora retransmite la información desde la BS a uno o más SSs. También puede proporcionar conexión a SS locales.

Los límites de la red FBWA están en las interfaces F y G, que se muestran en la figura. La interfaz F corresponde a los puntos de conexión con el núcleo de la red, y generalmente está estandarizada. La interfaz G, entre los SSs y los TE pueden estar estandarizados o ser propietarios de algún fabricante. (Muñoz, 2007).

II.3.1.4 SISTEMAS PMP

Los sistemas punto-multipunto (PMP) incluyen BSs, SSs y, en algunos casos, RSs. Las BSs utilizan antenas cuyos patrones son relativamente anchos, con lo cual se pueden utilizar dentro de uno o más sectores para lograr la cobertura de 360°. La conexión entre BSs no es parte de la red FBWA en si, se puede emplear enlaces de radio, fibra óptica, o cualquier medio equivalente.

II.3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ENLACES: CON Y SIN LÍNEA DE VISTA

La tecnología WiMAX prevé sistemas con línea de vista o comúnmente llamado por sus siglas en inglés LOS y sin línea de vista o NLOS, además de ofrecer lo mejor de ambos esquemas:

- Cobertura hasta 50 Km con línea de vista o LOS.
- Típica NLOS 8 Km.

En sistemas con línea de vista o LOS se requiere que la primera zona de Fresnel este despejada, esto depende de la distancia y de la frecuencia. Mientras que en un canal NLOS, la señal llega al receptor por varios caminos, denominados multitrayectos, producto de reflexiones múltiples y de la difracción; en el receptor puede producirse interferencia constructiva o destructiva, ya que estas señales tiene retardos, atenuación y polarización distintas. El rayo directo podría o no estar presente. (Marcano, 2006).

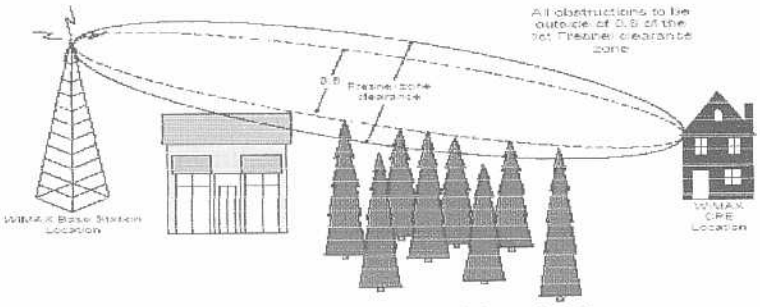


Figura 3. Propagación con Línea de Vista
Fuente: Marcano, 2006

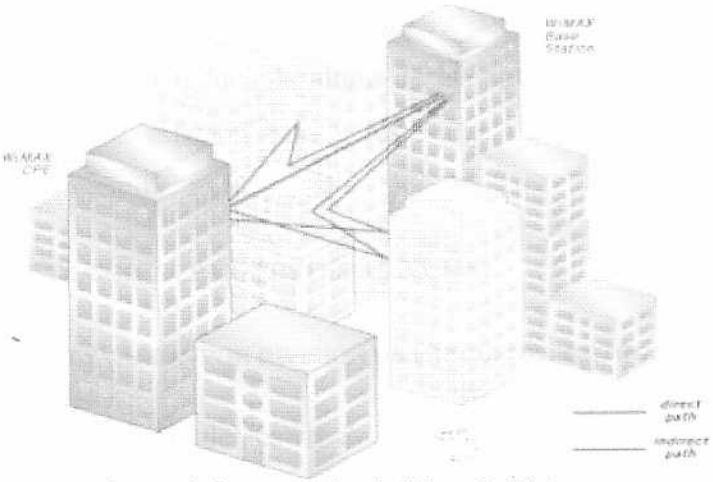


Figura 4. Propagación sin Línea de Vista
Fuente: Marcano, 2006

Los sistemas NLOS reducen los gastos de instalación en el lado cliente al necesitar menos infraestructura y ajustes. De igual manera no es necesario hacer *site survey detallado* o Estudio del Sitio detallado, ni tener precisas herramientas de planificación de radio. La clave para suministrar el servicio en un ambiente con multitrayectos está en usar adecuadamente la energía de las múltiples señales que llegan al receptor, para garantizar que exista potencia suficiente para superar la sensibilidad del radio receptor (Marcano, 2006).

Entre las ventajas que ofrecen los sistemas NLOS se pueden mencionar las siguientes:

Los requisitos estrictos de planificación y la altura de la antena a veces no se pueden cumplir para garantizar LOS. En grandes sistemas celulares contiguos, donde el reuso de frecuencia es crítico, reducir la altura de las antenas tiene la ventaja de reducir la interferencia co-canal entre celdas adyacentes. Por lo que la estación base se ve obligada a funcionar en NLOS.

Los sistemas LOS no pueden reducir la altura de las antenas, ya que si lo hacen se pierde el rayo directo entre la estación base y los equipos de los usuarios, lo cual es necesario para su funcionamiento

II.3.3 SOLUCIONES TECNOLÓGICAS PARA SISTEMAS NLOS:

II.3.3.1 OFDM (*MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENTA ORTOGONAL*):

OFDM se basa en la división del canal de comunicaciones, en el dominio de la frecuencia, en varios canales más pequeños, en cada uno de estos se transmite una subportadora. Cada una de las N subportadoras que se transmiten en los respectivos, N subcananles, deben ser ortogonales entre sí; esto se debe garantizar para permitir el

solapamiento de las N subportadoras sin que esto ocasione algún tipo de interferencia. La información que se envía es multiplexada en las subportadoras, para de este modo, transmitirla de forma paralela, lo que quiere decir, que ahora, en lugar de enviar una portadora que utilice todo el ancho de banda disponible, se envían varias subportadoras con un ancho de banda N veces menor, con lo cual se puede observar que esta técnica da lugar a un mejor aprovechamiento del ancho de banda disponible del canal gracias a que las subportadoras se pueden solapar, evitando de esta manera las bandas de guarda entre las portadoras. (Montiel, 2005).

En general se puede definir OFDM como un esquema de modulación en el cual los símbolos son transmitidos en paralelo empleando un numero considerable de subportadoras ortogonales, un bloque de N símbolos son transmitidos de forma serial en un tiempo Ts segundos cada uno. Este bloque se convierte en un bloque de N símbolos en paralelo que se transmiten en un tiempo T=N*Ts segundos cada uno (Montiel, 2005).

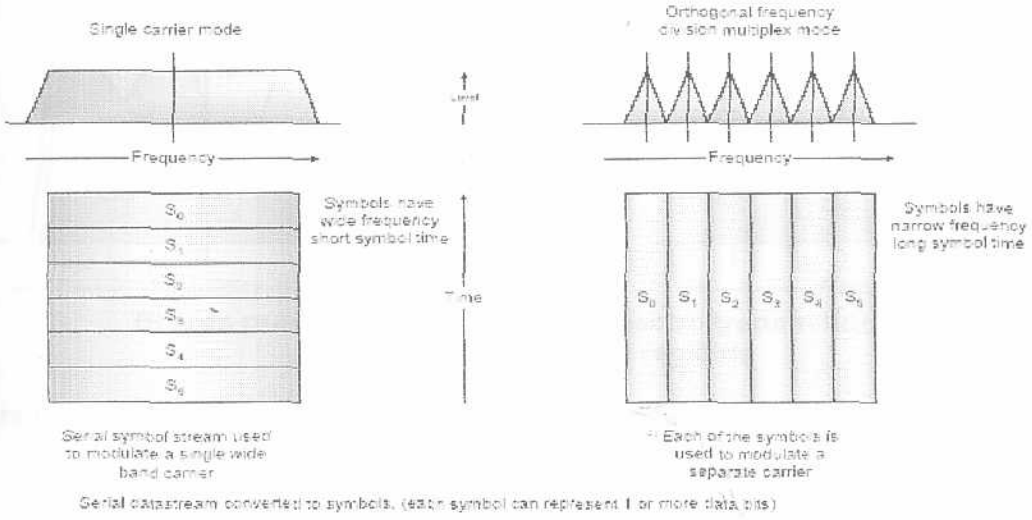


Figura 5. Simple portadora y OFDM. **Fuente:** Marcano, 2006

Ventajas de OFDM:

OFDM permite subsanar los problemas de la propagación NLOS

OFDM de WiMAX ofrece la ventaja de operar en ambientes NLOS con grandes *delay spread*

Debido al tiempo de símbolo y al uso de un prefijo cíclico, OFDM elimina los problemas de interferencia inter simbólica y la complejidad de la ecualización adaptativa.

Debido a que la señal OFDM está compuesta por varias portadoras ortogonales de banda angosta, el desvanecimiento selectivo afecta sólo un subconjunto de las portadoras, las cuales se pueden ecualizar fácilmente (Marcano, 2006)

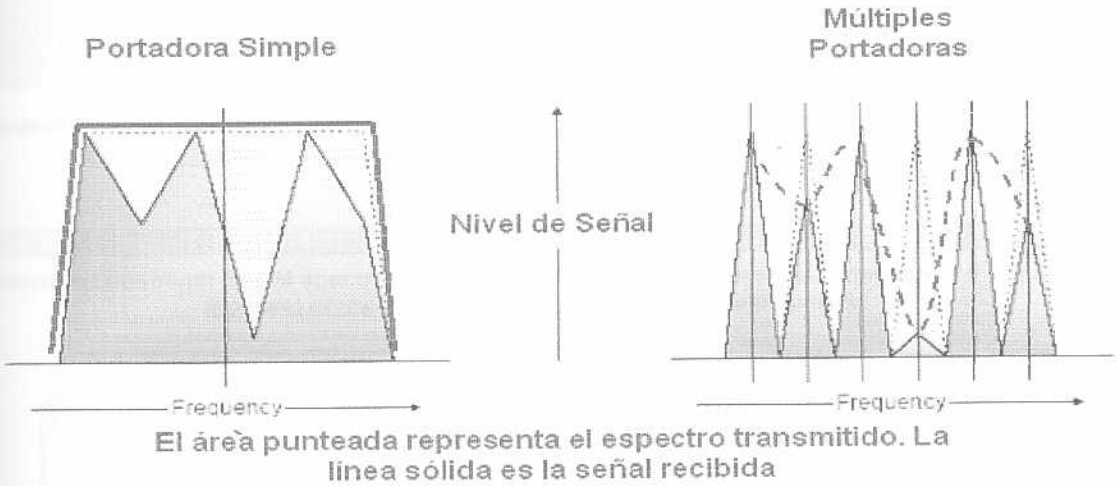


Figura 6. Comparación de una señal recibida con una simple portadora enviando la información en serie y con OFDM, donde la información se envía en paralelo.

Fuente: Marcano, 2006

II.3.3.2 SUB-CANALIZACIÓN

La subcanalización concentra la potencia transmitida en pocas subportadoras OFDM, esto es justamente lo que ayuda a incrementar la ganancia del sistema.

Permite extender la cobertura del sistema, superar las perdidas producidas por edificaciones y reducir el consumo de potencia en los equipos terminales.

La subcanalización en el *uplink* o enlace de subida es una opción que brinda WiMAX fijo. La subcanalización en OFDMA (Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia) permite mayor flexibilidad en el uso de los recursos que pueden soportar usuarios móviles. (Marcano, 2006)

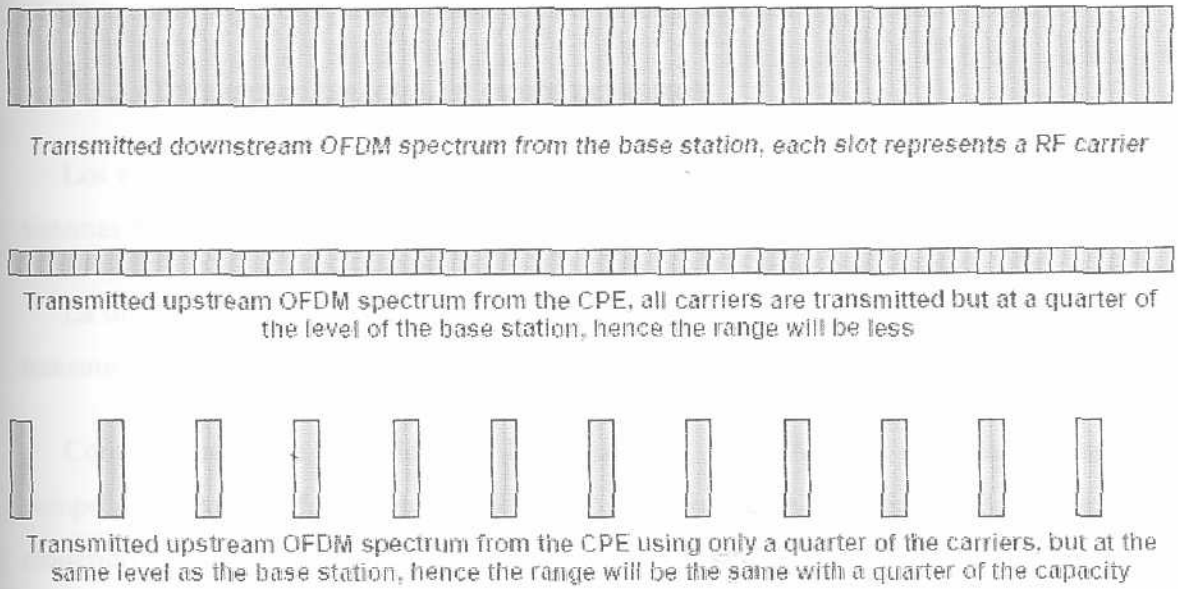


Figura 7. Subcanalización
Fuente: Marcano, 2006

II.3.3.3 ANTENAS DIRECTIVAS

Las antenas directivas, debido a su alta ganancia, incrementan el margen de desvanecimiento del enlace. El *Delay Spread*[1] también se reduce al usar antenas directivas.

Debido a la variación angular del diagrama de radiación en las antenas directivas, las señales de multitrayecto que llegan a través de los lóbulos laterales son eliminadas.

El IEEE 802.16, prevé la opción de usar sistemas de antenas adptativas, las cuales tienen la capacidad de modificar su diagrama de radiación con el fin de orientar el haz principal de manera dinámica.

Esto permite eliminar las señales que llegan en una dirección y privilegiar las que llegan en otras, contribuyendo a la reducción de la interferencia cocanal (Marcano, 2006).

II.3.3.4 DIVERSIDAD ESPACIAL EN AMBOS EXTREMOS

Los esquemas de diversidad se utilizan para sacar ventajas a los multitrayectos en los sistemas NLOS.

La diversidad es una opción en el estándar WiMAX usada tanto en recepción como en transmisión para aumentar la disponibilidad de los enlaces.

Como esquema de diversidad en la transmisión, WiMAX usa codificación espacio-tiempo para producir fuentes independientes, así se reduce el margen de desvanecimiento requerido y se combate la interferencia.

[1] Delay Spread es la desviación típica del retardo del PDP (Power Delay Profile). Donde el PDP caracteriza la potencia medida de los diferentes caminos de propagación

En la recepción existen varias técnicas que podrían usarse para mejorar la disponibilidad. Actualmente *Maximum Ratio Combining* (MRC) tiene varias ventajas en comparación con los sistemas basados en dos receptores separados.

La diversidad ha demostrado experimentalmente ser muy efectiva para mejorar los sistemas NLOS. (Marcano, 2006)

II.3.3.5 Modulación Adaptativa

Consiste en escoger la modulación en función de la *SNR* del enlace de radio.

Cuando el radio enlace tiene una gran calidad, se usan esquemas de modulación de mayor capacidad, también llamados modulación alta, en contraste con los de baja capacidad denominados esquemas de modulación baja. Durante el proceso de desvanecimiento de una señal, WiMAX puede cambiar a esquemas de modulación baja con el fin de mantener el enlace. La ventaja principal de la modulación adaptativa es que incrementa el rango en el cual se pueden usar las modulaciones altas, a diferencia de los sistemas que tienen una modulación fija, donde el presupuesto de potencia del enlace se hace para las peores condiciones (Marcano, 2006)

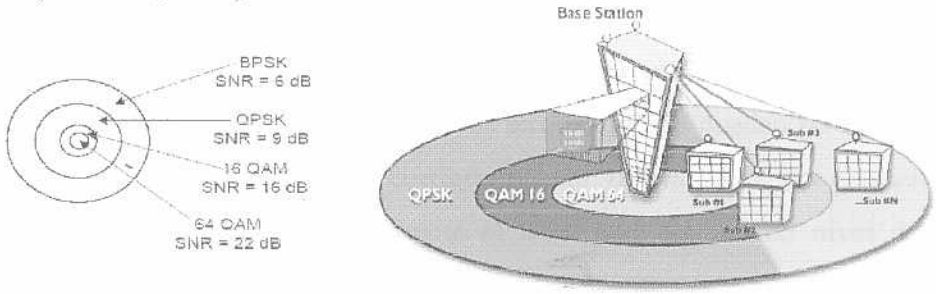


Figura 8. Radio relativo de la celda para modulación adaptativa y los diferentes valores de la SNR para cada modulación.

Fuente: Marcano, 2006

II.3.3.6 TÉCNICAS DE CORRECCIÓN DE ERRORES

Para mejorar la carga útil de la trama o el *throughput* se usan poderosas técnicas de FEC como REED SOLOMON, Códigos Convolucionales y Algoritmos de *Interleaving* para detectar y corregir errores. A continuación se enumeran algunas de las características de FEC(Marcano,2006):

Adicionar redundancia Dos grandes tipos. La diferencia está en la presencia o ausencia de memoria entre dos códigos consecutivos en el codificador.

Códigos en Bloques o *Block Codes*: BOSE-CHAUDHURI-HOCQUENGHEM (BCH), REED-SOLOMON (RS). Este codificador trabaja sobre un bloque de bits del mensaje llamado *"digits"*, en lugar de hacerlo bit-a-bit. Existen técnicas de decodificación para RS muy eficientes. RS es un subconjunto de los códigos BCH.

Códigos Convolucionales: TREE, TRELLIS, diagrama de estado. Código (n,k), $n>k$: El codificador acepta un bloque de k-bits. Agrega una redundancia de $n-k$ bits que están relacionados con el mensaje. La palabra de n bits, se denomina *code word* y n es la longitud del bloque codificado. La velocidad de codificación es $R=k/n$

Estas técnicas se usan para corregir tramas erradas producto de desvanecimiento selectivo en frecuencia o ráfagas de errores. Los errores que no puedan ser corregidos con las técnicas de FEC automáticamente se corrigen usando *Automatic Repeat Request* (ARQ). Por supuesto esto mejora considerablemente el BER para un mismo nivel de umbral. (Marcano, 2006).

Resumen de los tipos de FEC obligatorios para IEEE 802.16

Código tipo 1: sólo REED–SOLOMON. Útil para grandes bloques de datos y para altas tasas de transmisión. La protección puede variar entre t=0 a t=16

Código tipo 2: REED–SOLOMON + Código Convolucional 2/3 (*softdecodable*). Útil para tasas de bits moderadas brindando una buena relación C/N. El número de bytes debe ser par

Código Tipo 3: REED–SOLOMON + *Parity check*. Se usa para tasas entre altas y moderadas un bloques de tamaño promedio (ej. K = 16, 53, or 128). Se agrega un simple bit obtenido a partir de un byte. El código de paridad puede usarse para corrección de errores usando *soft decoder*

Código tipo 4: BTC (*Block Turbo Code*). Se usa cuando se requiere extender la cobertura de una BS

Modulation	Uncoded block size (bytes)	Coded block size (bytes)	Overall coding rate	RS code	CC code rate
BPSK	12	24	1/2	(12,12,0)	1/2
QPSK	24	48	1/2	(32,24,4)	2/3
QPSK	36	48	3/4	(40,36,2)	5/6
16-QAM	48	96	1/2	(64,48,8)	2/3
16-QAM	72	96	3/4	(80,72,4)	5/6
64-QAM	96	144	2/3	(108,96,6)	3/4
64-QAM	108	144	3/4	(120,108,6)	5/6

De la tabla se puede obtener el número de bloques de salida del Codificador en función de las tasas de Codificación involucradas, es decir, tasas de los codificadores RS y CC (Códigos Convolucionales):

$$\#\text{Bloques de salida} = \#\text{Bloques de entrada} \times 1/T_{RS} \times 1/T_{CC}$$

disminuir la interferencia de la señal que reciben los usuarios. La desventaja de utilizar esta estrategia es que disminuye la eficiencia espectral de la red, lo cual se ve reflejado en menos clientes por canal, cuando se les está asegurando un cierto nivel de QoS. (Muñoz, 2007).

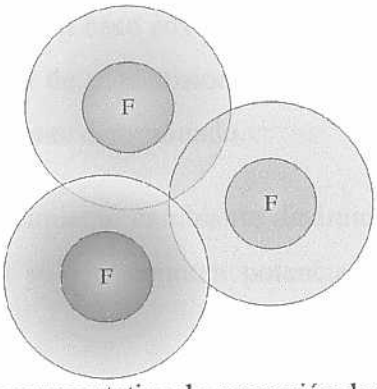


Figura 9. Diagrama representativo de separación de subcanales en una celda.
Fuente: Muñoz, 2007

En despliegues con una mayor densidad de estaciones base, se puede optar por utilizar solo algunos de los subcanales que se dispone por celda, de modo que en celdas adyacentes no utilicen los mismos. Al igual que la solución ilustrada en la figura anterior se pierde eficiencia espectral y capacidad. Éste caso corresponde al uso de antenas omnidireccionales, en el caso de antenas direccionales de 90 y 60 grados, se recomienda utilizar varios canales en el despliegue de la red. En la Figura se muestra 3 ejemplos para el caso de antenas de 90 grados, en el primer caso, de izquierda a derecha, se utilizan 4 canales, en el segundo 2 canales para los 4 sectores, por último se utiliza 4 canales y 2 subcanales.

El proceso de planificación de frecuencia es un proceso iterativo ya que una vez hecho el despliegue con una disposición de frecuencias determinada, se debería monitorear los niveles de interferencia de modo de verificar las estimaciones hechas por los programas

II.3.3.7 CONTROL DE POTENCIA

Se usa para mejorar el *performance* global del sistema

Es implementado por la estación base enviando comandos de control de potencia a las SSs para que regulen su potencia de transmisión, con el fin que la potencia recibida en la BSs sea igual a un nivel previamente determinado

En un ambiente de desvanecimiento cambiante dinámicamente, el prefijar un nivel de potencia significa que las SSs sólo transmiten potencia suficiente para cumplir con lo establecido

El control de potencia reduce el consumo total de potencia del sistema y la interferencia potencial entre BSs co-localizadas

Mientras que en sistemas LOS la potencia depende casi exclusivamente de la distancia entre la BS y la SS, en sistemas NLOS la potencia depende adicionalmente del despeje y de las obstrucciones.

II.3.3.8 REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIAS

Una red WiMAX se puede desplegar con un factor de reutilización de frecuencia igual a 1, esto podrá mantenerse si la interferencia entre celdas lo permite. Una solución para la interferencia entre celdas es el uso de los subcanales. En la siguiente figura se muestra un diagrama con el ejemplo anterior, en donde los círculos más pequeños utilizan los mismos subcanales y en los bordes de la celda, donde existe solapamiento entre celdas, se utilizan sólo algunos y distintos a los utilizados en las celdas adyacentes. De este modo se logra

especializados, y la conveniencia de segmentar los subcanales a utilizar en cada celda, ya que podría darse el caso que esto fuese necesario sólo en algunas celdas.

El último caso en donde se utilizan 2 subcanales por sector se refiere al mecanismo que posee la interfaz OFDMA de WIMAX, en donde el total de subportadoras, el cual depende del ancho de banda del canal, es dividido en 2 grupos o subcanales. De esta forma es posible utilizar la porción del canal de frecuencias bajas para las zonas más alejadas de la BS, debido a su conocida característica de mejor resistencia a interferencias. (Muñoz, 2007).

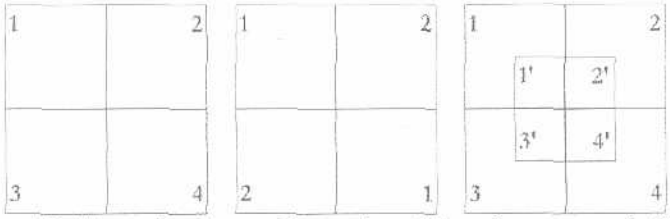


Figura 10. Ejemplos de uso de canales utilizando antenas de 90 grados.
Fuente: Muñoz, 2007

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO Y DESARROLLO

En éste capítulo se describen, de manera detallada, todas las actividades que fueron necesarias llevar a cabo para poder dar cumplimiento a todos los objetivos planteados. A continuación se recordará brevemente el objetivo fundamental del presente Trabajo Especial de Grado y la manera en la cual se le dará cumplimiento al mismo:

Determinar la capacidad de una red fija basada WIMAX IEEE 802.16d. Esto se refiere a la cantidad máxima de usuarios que puede soportar dicha red y a la tasa de transmisión máxima relacionada con cada uno de ellos. En la realización del Objetivo General se emplearán instrumentos para la obtención de información y cálculo tales como:

- Documentales: Investigaciones bibliográficas a materiales impresos y electrónicos existentes, que permitan conocer las especificaciones técnicas del estándar IEEE 802.16d.

- De Campo: Están representados por todos los cálculos teóricos que se efectuarán, así como el uso de software y herramientas de simulación. Dichos software serán Matlab R2006a y RadioMobile 7.5.7

Por lo antes expuesto se tomó la decisión de desarrollar las actividades, involucradas en el presente Trabajo Especial de Grado, en fases que se describen a continuación (figura 8):

Figura 11. Fases de desarrollo del Trabajo Especial de Grado
Fuente: Elaboración propia

III.1 Fase I Investigación Bibliográfica.

En primer lugar, se realizó una investigación teórica, tanto en material impreso como en material electrónico, acerca de todos los conceptos estrechamente relacionados con WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), específicamente todos aquellos vinculados con los sistemas de transmisión digital, analizando temas como: Ley de Shannon, Enlaces satelitales, Modulaciones Digitales y Métodos de codificación de canales.

III.2 Fase II Análisis de Información y Cálculos

Con la información obtenida en la Fase I se procedió al cálculo de los parámetros involucrados en los enlaces WIMAX, tales como potencia recibida, relación señal a ruido, tasa binaria y capacidad del sistema. Además del estudio, en detalle, del estándar IEEE 802.16d, lo cual permitió conocer las especificaciones técnicas de dicha tecnología y tenerlas como datos en las ecuaciones a usar.

Antes de elaborar los cálculos fue necesario realizar un breve análisis de la información recopilada así como de las principales características del estándar para así poder comprender los resultados que se obtendrían con dichos cálculos.

A continuación se realizará un breve resumen de los aspectos más importantes en el análisis hecho a la información recopilada.

III.2.1 El Medio Inalámbrico

Haciendo un corto análisis del medio inalámbrico y las comunicaciones en él se tiene que una comunicación inalámbrica es cuando los medios de unión entre sistemas no son

n cables. Sus principales ventajas consisten en permitir una facilidad de emplazamiento y ıbicación, evitando la necesidad de establecer un cableado y rapidez en la instalación. s técnicas utilizadas son: por Infrarrojos (IR), y por radiofrecuencia (RF), en donde, ésta tima es la usada por WIMAX.

I.2.2 MODULACIÓN DIGITAL

En un sistema de transmisión digital, la información de la fuente original puede ser en rma digital o analógica. Si está en forma analógica, tiene que convertirse a pulsos gitales, antes de la transmisión y convertirse de nuevo a la forma analógica, en el extremo recepción. En un sistema de radio digital, la señal de entrada modulada y la de salida modulada, son pulsos digitales.

En esencia, hay tres técnicas de modulación digital que se suelen utilizar en sistemas de dio digital: transmisión (modulación) por desplazamiento de frecuencia (FSK), ınsmisión por desplazamiento de fase (PSK), y modulación de amplitud en cuadratura)AM).

A continuación se hará una breve descripción de cada una de las técnicas de odulación digital.

III.2.2.1 TRANSMISIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA (FSK)

El FSK binario es una Forma de modulación angular de amplitud constante, similar a la odulación en frecuencia convencional, excepto que la señal modulante es un flujo de ılsos binarios que varía, entre dos niveles de voltaje discreto, en lugar de una forma de nda analógica que cambia de manera continua. La expresión general para una señal FSK naria es:

$$v(t) = Vc \cos [(wc + vm(t) Dw / 2)t]$$

donde

v(t) = forma de onda FSK binaria

Vc = amplitud pico de la portadora no modulada

wc = frecuencia de la portadora en radianes

vm(t) = señal modulante digital binaria

Dw = cambio en frecuencia de salida en radianes

De la ecuación anterior puede verse que con el FSK binario, la amplitud de la portadora Vc se mantiene constante con la modulación. Sin embargo, la frecuencia en radianes de la portadora de salida (wc) cambia por una cantidad igual a $\pm$ Dw/2.

La salida de un modulador de FSK binario, es una función escalón en el dominio del tiempo. Conforme cambia la señal de entrada binaria de 0 lógico a 1 lógico, y viceversa, la salida del FSK se desplaza entre dos frecuencias: una frecuencia de marca o de 1 lógico y una frecuencia de espacio o de 0 lógico. Con el FSK binario, hay un cambio en la frecuencia de salida, cada vez que la condición lógica de la señal de entrada binaria cambia. A continuación se muestra una figura que ilustra lo arriba expuesto.

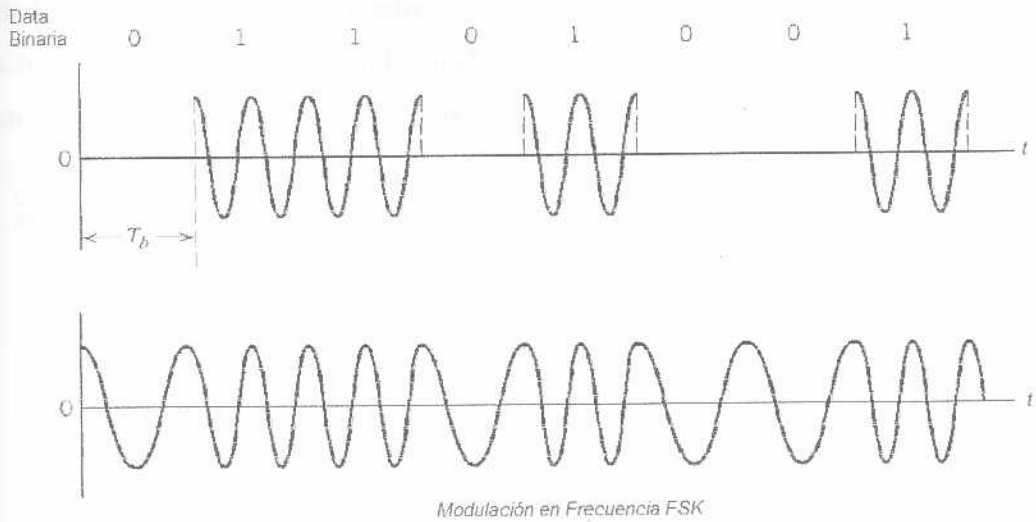


Figura 12. Modulación en Frecuencia FSK
Fuente: Murray, 2000

III.2.2.2 TRANSMISIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE FASE (PSK)

Transmitir por desplazamiento en fase (PSK) es otra forma de modulación angular, modulación digital de amplitud constante. El PSK es similar a la modulación en fase convencional, excepto que con PSK la señal de entrada es una señal digital binaria y son posibles un número limitado de fases de salida.

III.2.2.3 TRANSMISIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE BINARIA (BPSK)

Con la transmisión por desplazamiento de fase binaria (BPSK), son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de portadora. Una fase de salida representa un 1 lógico y la otra un 0 lógico. Conforme la señal digital de entrada cambia de estado, la fase de la

portadora de salida se desplaza entre dos ángulos que están 180° fuera de fase. El BPSK es una forma de modulación de onda cuadrada de portadora suprimida de una señal de onda continua. La siguiente figura muestra la modulación por fase.

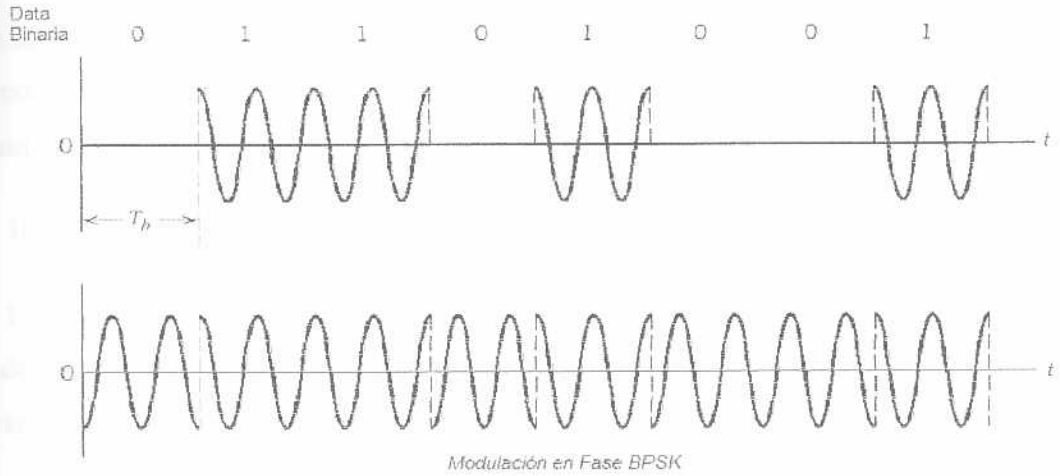


Figura 13. Modulación Binaria por Fase BPSK

Fuente: Murray, 2000

III.2.2.4 TRANSMISIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE CUATERNARIA (QPSK)

La transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK) o, en cuadratura PSK, como a veces se le llama, es otra forma de modulación digital de modulación angular de amplitud constante. La QPSK es una técnica de codificación M-ario, en donde M=4 (de ahí el nombre de "cuaternaria", que significa "4"). Con QPSK son posibles cuatro fases de salida, para una sola frecuencia de la portadora. Debido a que hay cuatro fases de salida diferentes, tiene que haber cuatro condiciones de entrada diferentes. Ya que la entrada

digital a un modulador de QPSK es una señal binaria (base 2), para producir cuatro condiciones diferentes de entrada, se necesita más de un solo bit de entrada. Con 2 bits, hay cuatro posibles condiciones: 00, 01, 10 y 11. En consecuencia, con QPSK, los datos de entrada binarios se combinan en grupos de 2 bits llamados dibits. Cada código dibit genera una de las cuatro fases de entrada posibles. Por tanto, para cada dibit de 2 bits introducidos al modulador, ocurre un sola cambio de salida. Así que, la razón de cambio en la salida es la mitad de la razón de bit de entrada.

III.2.2.5 MODULACIÓN DE AMPLITUD EN CUADRATURA (QAM)

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM), es una forma de modulación digital en donde la información digital está contenida, tanto en la amplitud como en la fase de la portadora trasmitida.

III.2.2.6 QAM DE OCHO (8-QAM)

El QAM de ocho (8-QAM), es una técnica de codificación M-ario, en donde M = 8. A diferencia del 8-PSK, la señal de salida de un modulador de 8-QAM no es una señal de amplitud constante.

III.2.2.7 QAM DE DIECISÉIS (16-QAM)

Así como en 16-PSK,-el 16-QAM es un sistema M-ario, en donde M= 16. Actúa sobre los datos de entrada en grupos de cuatro (2 4 = 16). Como con el 8-QAM, tanto la fase y la amplitud de la portadora transmisora son variados.

III.2.2.8 RESUMEN DE FSK, PSK Y QAM

Las distintas formas de FSK, PSK y QAM se resumen en la tabla 1

Modulación	Codificación	BW (Hz)	Baudio	Eficiencia BW (bps/Hz)
FSK	Bit	á f b	f b	1
BPSK	Bit	f b	f b	1
QPSK	Dibit	f b / 2	f b / 2	2
8-QPSK	Tribit	f b / 3	f b / 3	3
8-QAM	Tribit	f b / 3	f b / 3	3
16-QPSK	Quadbit	f b / 4	f b / 4	4
16-QAM	Quadbit	f b / 4	f b / 4	4

Tabla 2. Resumen de la Modulación Digital
Fuente: Murray, 2000

III.2.2.9 RECUPERACIÓN DE LA PORTADORA

La recuperación de la portadora es el proceso de extraer una portadora de referencia coherente, en fase, de una señal recibida. A esto se le llama, a veces, referencia de fase.

En las técnicas de modulación en fase los datos binarios fueron codificados como fase precisa de la portadora transmitida. Dependiendo del método de codificación, la separación angular entre los fasores adyacentes varió entre 30° y 180°. Para demodular correctamente los datos, se recuperó y comparó una portadora de fase coherente, con la portadora recibida, en un detector de producto. Para determinar la fase absoluta de la portadora recibida, es necesario producir una portadora en el receptor que sea coherente, en fase, con el oscilador de referencia transmitida. Esta es la función del circuito de recuperación de la portadora.

III.2.3 ASIGNACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE FRECUENCIAS

Al volver a utilizar una frecuencia, que es utilizada como canal de comunicación, en celdas cercanas se produce interferencia, degradando la calidad de la señal y por lo tanto la calidad de servicio.

Cluster corresponde a la agrupación de celdas en donde se utilizan todos los canales de frecuencias, sin que éstos se repitan, que se dispone. Por ejemplo un operador puede tener la concesión de 12 canales de frecuencias en una banda determinada, si el operador implementa 3 BTS por sitio y utiliza 2 canales en cada celda, utilizará los 12 canales en 6 *celdas luego las próximas 6 celdas utilizarán las mismas 12 frecuencias y así* sucesivamente, ver

Figura, entonces se dice que la agrupación de celdas o *cluster* utilizado es de tamaño 6.

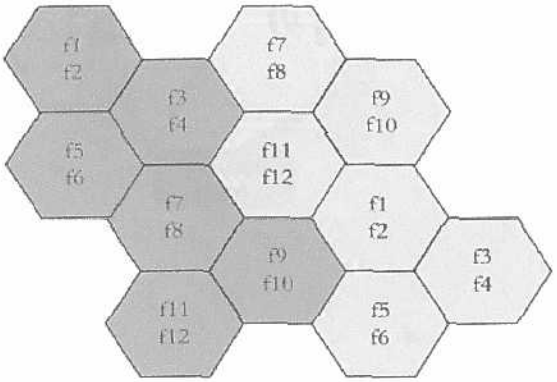


Figura 14. Formación de una agrupación de 6 celdas.
Fuente: Muñoz, 2007

La distancia entre las dos celdas más cercanas que utilizan la(s) misma(s) frecuencia(s) es llamada distancia de reutilización. A medida que esta distancia disminuye, mayor será la interferencia entre los canales.

Los operadores generalmente buscan disminuir el tamaño de la agrupación de celdas, para obtener un mayor factor de rehúso de frecuencia y así aumentar su capacidad de atención a más clientes

III.2.4 WIMAX Y SUS CARACTERÍSTICAS

Primero que todo se debe recordar que el estándar 802.16x fue desarrollado por el IEEE con el objeto de proporcionar sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha y gran alcance.

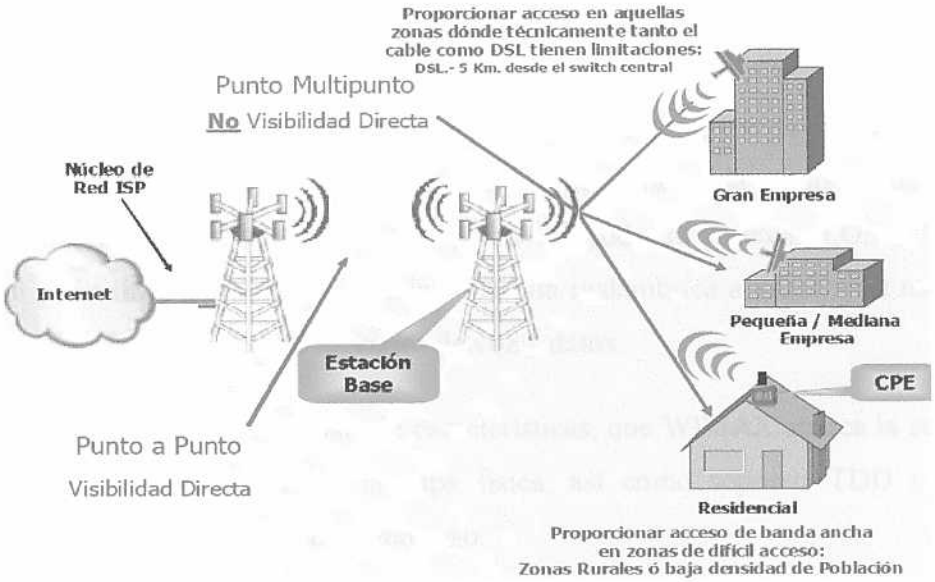


Figura 15. Ejemplo ultima milla WIMAX
Fuente: Gonzalo, 2005

De aquí se puede mencionar unas de las características principales, el Alcance. WIMAX puede alcanzar distancias de hasta 50Km, bajo condiciones especiales. Además puede tener velocidades de 75Mbps que varían según la distancia y la modulación. Con esto se salta a la siguiente característica, la Modulación Adaptativa, que es una de las herramientas que permite al enlace recorrer grandes distancias; consiste en escoger una modulación dependiendo de la relación señal a ruido del radio enlace. Cuando el enlace es de gran calidad WIMAX selecciona una modulación de mayor capacidad o modulación de

alta, en contraste con los esquemas de modulación de baja capacidad que son usados en los casos de desvanecimiento, además es uno de los puntos de estudio de la presente investigación.

Su modo de operación es de 256 FFT OFDM, concentrándose particularmente en la banda de 2 a 11 GHz. Funciona con y sin línea de vista. Es el único sistema inalámbrico que ofrece QoS (Calidad de Servicio).

WIMAX representa el estado del arte para el acceso inalámbrico banda ancha en donde resalta otra de sus muchas características que es la arquitectura usada punto-multipunto o en malla con lo cual desde la estación base, y con la ayuda de sistemas LOS y NLOS (Sistemas con y sin línea de vista), se brinda cobertura inalámbrica a numerosos usuarios residenciales y empresariales, dando servicios de voz y datos.

Cabe destacar en el presente análisis de características, que WIMAX abarca la capa de control de acceso al medio MAC y la capa física, así como soportar TDD y FDD permitiendo full y half-duplex en éste último caso.

Por último, es importante mencionar que el estándar 802.16 tiene contemplado las técnicas FEC para la corrección de errores en las etapas de codificación del canal que comprenden aleatorización, FEC, *interleaving*, modulación e inserción de la señal piloto.

Las características anteriormente mencionadas son resumidas en la tabla que se mostrará a continuación:

Característica	Descripción
Sin Línea de vista (NLOS)	No necesita línea de visión entre la antena y el equipo suscriptor
Multiplexación OFDM (OrthogonalFrequencyDivisionMultiplexing)	Permite la transmisión simultánea de múltiples señales a través de cable o aire en diversas frecuencias; usa espaciamiento ortogonal de las frecuencias para prevenir interferencias.
Antenas inteligentes	Soporta mecanismos de mejora de eficacia espectral en redes inalámbricas y diversidad de antenas
Topología punto-multipunto y de malla	Soporta dos topologías de red, servicio de distribución multipunto y la malla para comunicación entre suscriptores.
Calidad de Servicio (QoS)	Califica la operación NLOS sin que la señal se distorsione severamente por la existencia de edificios, por las condiciones climáticas ni el movimiento vehicular.
FDM (*Frequency Division Multiplexing*) y TDM (*Time Division Multiplexing*)	Tipos de multiplexación que soporta para propiciar la interoperabilidad con sistemas celulares (FDM) e inalámbricos (TDM).
Modulación, Codificación, Ecualización,	Adaptativas.

Tabla 3. Resumen de características de WIMAX
Fuente: http://www.intel.com/netcomms/technologies/wimax/index.htm

III.2.5 CÁLCULOS

Se realizaron los cálculos de los parámetros involucrados en un enlace WIMAX mencionados al inicio de éste capítulo. Dichos cálculos se describen a continuación; debido a que todo lo referente a los parámetros fue explicado en el Capítulo II, en éste apartado sólo se expondrán las ecuaciones usadas en cada cálculo acompañadas de una breve descripción:

III.2.5.1 PIRE

El acrónimo PIRE viene de las iniciales del nombre Potencia Isotrópica Radiada Efectiva de la antena transmisora, y a fines del cálculo, corresponde a la potencia transmitida multiplicada por la ganancia de la antena transmisora, como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$PIRE = Pt*Gt$$

Donde:

Gt = Ganancia de la antena transmisora

Pt = Potencia de la antena transmisora

En términos de decibeles queda de la siguiente manera:

$$PIRE = 10*\log_{10}(Pt*Gt)$$

III.2.5.2 PEL

Éste acrónimo significa Perdidas en el Espacio Libre, y a fines de los cálculos, viene dado por la siguiente expresión:

$$PEL = [(4*\pi*D)/\lambda]^2$$

En términos de decibeles:

$$PEL(dB) = 20*\log_{10}(D) + 20*\log_{10}(F) + 92.5dB$$

Donde:

D = distancia del enlace en Km

F = Frecuencia de trabajo en GHz

Y el término 92.5dB es una constante proveniente de la ecuación: $(4* \pi*10^{12}) / C$, con C igual a la velocidad de la luz .

III.2.5.3 Modelos de Predicción de *path loss*

MODELO EMPÍRICO OKUMURA-HATA:

Éste es uno de los modelos más usados en macrocélulas. Okumura traza curvas medias para el *Path Loss* basados en una extensa base de datos empiricos recolectados en la ciudad de Tokio, Japón.

El modelo, para un ambiente típico Urbano, viene dado por la siguiente ecuación:

$$PL_{HataTU}(dB) = 69.55 + 26.16\log_{10}(fc) - 13.82\log_{10}(h_{BS}) - a(h_{MS}) + [44.9 - 6.5582\log_{10}(h_{BS})] \log_{10}(d)$$

Donde:

fc = frecuencia de la portadora en MHz

h_{BS} = Altura de la estación base en metros

h_{MS} = Altura de la estación móvil en metros

d = distancia entre la estación base y la estación móvil en Kilómetros

$a(h_{MS})$ = factor de corrección para ciudades de pequeñas a medianas densidades.

$a(h_{MS}) = [1.1\log_{10}(fc) - 0.7]\, h_{MS} - [1.56\log_{10}(fc) - 0.8]$

PARA CIUDADES GRANDES:

$$a(h_{MS}) = \begin{cases} 8.29[\log_{10}(1.54h_{MS})]^2 - 1.1 & \text{si } fc \leq 200MHz \\ \\ 3.2[\log_{10}(11.75h_{MS})]^2 - 4.97 & \text{si } fc \geq 400MHz \end{cases}$$

PARA UN AMBIENTE TÍPICO SUBURBANO:

$$PL_{HataTS}(dB) = PL_{HataTU}(dB) - 2[\log_{10}(fc/28)]^2 - 5.4$$

PARA UN AMBIENTE RURAL:

$$PL_{HataRU}(dB) = PL_{HataTU}(dB) - 4.78[\log_{10}(fc)]^2 + 18.33\log_{10}(fc) - 40.94$$

Donde:

fc: debe estar entre 150MHz y 1500MHz

h_{BS}: debe estar entre 30m y 200m

h_{MS}: debe estar entre 1m y 10m

d: debe estar entre 1Km y 20Km

MODELO COST231-HATA

Éste modelo es una extensión del modelo HATA para el uso de frecuencias entre 1500MHz y 2000MHz. Y está basado en la propuesta Mogensen. Los límites son:

fc: debe estar entre 1500MHz y 2000MHz

h_{BS}: debe estar entre 30m y 200m

h_{MS}: debe estar entre 1m y 10m

d: debe estar entre 1Km y 20Km

El Modelo de *Path Loss* Cost231-Hata viene dado por la siguiente ecuación:

$$PL_{Cost231Hata}(dB) = A + B[\log_{10}(d)] + C$$

Donde:

$A = 46.3 - 33.9[\log_{10}(fc)] + 13.82\log_{10}(h_{BS}) - a(h_{MS})$

$B = 44.9 - 6.55[\log_{10}(h_{BS})]$

C= 0 si se trata de un ambiente o áreas con moderada densidad de árboles

C=3 si se trata de ambientes Urbanos

MODELOS ANALÍTICOS SIMPLIFICADOS PARA AMBIENTES URBANOS Y SUBURBANOS DE XIA

XIA identifica tres procesos de propagación como los componentes más importantes que predominan en la radiopropagación en ambientes urbanos y suburbanos. Éstos son:

- Pérdidas de propagación en el espacio libre. Y viene dado por la siguiente ecuación:

$$PL_{XIA\,(dB)} = 40\log_{10}(D) + 30\log_{10}(f) + 49dB$$

  Donde:

  D: distancia del enlace. Viene dada en Km

  F: frecuencia de la portadora. Viene dada en MHz

- Pérdidas adicionales por difracción múltiples en el nivel superior a los tejados. Y viene dado por la siguiente ecuación:

$$PL_{XIA\,(dB)} = 38\log_{10}(D) - 18\log_{10}(h_{BS} - hroof) + 21\log_{10}(f) + 81.5dB$$

Donde:

D: distancia del enlace. Viene dada en Km

F: frecuencia de la portadora. Viene dada en MHz

hroof: altura media de los obstáculos o edificios dada en metros.

- Pérdida de altura media al nivel de los obstáculos o edificios (rua), que viene dada por la siguiente expresión:

$$PL_{XIA\,(dB)} = 40\log_{10}(D) + 40\log_{10}(f) + 35dB$$

Donde:

D: distancia del enlace. Viene dada en Km

F: frecuencia de la portadora. Viene dada en MHz

MODELO COST231-WALFISH-IKEGAMI

Éste modelo puede ser utilizado para frecuencias entre 800MHz a 2000MHz con distancias desde 20m a 5Km. Viene dada por la siguiente ecuación:

$$PL_{COST231\text{-}WI\,(dB)} = 26\log_{10}(D) + 20\log_{10}(f) + 42.6Db, \quad si\ d \geq 0.02Km$$

Donde:

D: distancia entre las antenas. Viene dada en Km

F: frecuencia de propagación. Viene dada en MHz

III.2.5.4 Potencia Recibida

Se realizará un balance del enlace efectuando el cálculo de la potencia recibida por la antena receptora del sistema, en donde se tomarán en cuenta factores tales como:

- $P_T(dBm)$ potencia del transmisor
- $L_{TT}(dB)$ pérdidas totales en los terminales del transmisor
- $G_T(dBi)$ ganancia de la antena transmisora
- $L_b(dB)$ pérdidas básicas de propagación
- $G_R(dBi)$ ganancia de la antena receptora
- $L_{INT}(dB)$ pérdidas por penetración en interiores
- $L_{TR}(dB)$ pérdidas totales en los terminales del receptor.

Luego, la potencia recibida por la antena receptora viene dada por la siguiente expresión:

$$P_R(dBm) = P_T - L_{TT} + G_T - L_b + G_R - L_{INT} - L_{TR}$$

III.2.5.5 Potencia del Ruido en el receptor

El ruido en el equipamiento del receptor fue calculado de la siguiente manera:

$$N_{RX}(dBm)=-174+NF+10*\log_{10}(BW_{RX})$$

donde NF(dB) (*Noise Figure* o figura de ruido) es el factor de ruido del receptor y BW_{RX}(Hz) el ancho de banda de recepción.

III.2.5.6 Relación Señal a Ruido

Por tanto se define la relación señal a ruido (*en inglés signal to noise ratio o SNR*) como el cociente entre la potencia de señal y la potencia de ruido.

$$SNR = P_R / N_{RX}$$

en donde tanto la potencia recibida como la potencia del ruido en el receptor están dadas en wattios. Para el caso de los cálculos realizados, se determinó la relación señal a ruido en términos de dB de la siguiente manera:

$$SNR = P_R - N_{RX}$$

Aunque también es común encontrar la SNR con la expresión que se muestra a continuación:

$$SNR(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{\text{Potencia de Señal}}{\text{Potencia de Ruido}}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{V_{X,rms}}{V_{N,rms}}\right)$$

III.2.5.7 Capacidad Máxima del Canal

La capacidad máxima de un canal viene dada por el Teorema de Shannon, el cual enuncia que la capacidad del canal C, teniendo en cuenta que es la tasa máxima teórica de

datos limpios (o arbitrariamente la tasa mínima de error) pueden ser enviados con una determinada potencia media de señal S a través de un canal de comunicación analógico que sufre un ruido blanco gaussiano de potencia N.

Dicha capacidad viene dada por la siguiente ecuación:

$$C = 2BWrx*\log_2(1+SNR)$$

Donde BWrx es el ancho de banda de recepción y SNR es la relación señal a ruido.

III.2.5.8 Throughput y Tasa Binaria

El Throughput es la carga útil de la trama que queda disponible para el envío de datos e información después de la cabecera y datos de control de la trama. Teóricamente el Throughput debe ser menor que la Capacidad de Shannon.

Para este cálculo se tomó como Overhead un 20% ya que es el valor tomado para los sistemas celulares con método de acceso TDM, y dado que TDM es uno de los métodos de acceso de WIMAX se tomó como eficiencia de acceso el valor característicos de TDM que es de 90% , con lo cual el Throughput, para WIMAX, queda expresado de la siguiente manera:

$$\text{Througput} = (\text{Tráfico}*(1+0.2))/(0.9*\text{Tasa})\ [\text{bps}]$$

Donde Tráfico se refiere al Tráfico del canal y Tasa a la tasa de codificación usada en el enlace dependiendo de la SNR y de la modulación a usar.

Para el cálculo de las tasas binarias que se conseguirán con una portadora, el estándar 802.16 proporciona la siguiente expresión:

$$R(Mbps) = [(\frac{8BW}{7})*b_n*C_r*N_{utilFFT}]*[1 / (N_{FFT} + \frac{N_{FFT}}{Tg})]$$

donde *BW* es el ancho de banda de canalización en MHz, $N_{utilFFT}$= 196 y N_{FFT}= 256 en el caso de utilizar una capa física de tipo OFDM, y $N_{utilFFT}$= 1536 y N_{FFT}= 2048 en el caso de utilizar una capa física de tipo OFDMA. Estas dos capas físicas serán las utilizadas por los equipos WiMAX, no produciéndose el uso de la capa física basada en portadora simple.

III.2.5.9 Cantidad de Canales en un Sistema TDMA

Para el cálculo de cantidad de canales simultáneos en un sistema TDMA se consideró la siguiente ecuación:

$$N = (m*(BW_{total}-2*BW_{guard}) / BWc)$$

En donde BW_{total} es el ancho de banda total, BW_{guard} es el ancho de banda de guarda y BWc es el ancho de banda del canal; m es un estimado de la cantidad de usuarios que puede soportar el enlace WIMAX dependiendo de las características del mismo.

III.3 Diseño y Simulación

En el presente apartado se explicará el proceso de Diseño del programa de cálculo y planificación de la capacidad de una red fija basada en WIMAX, así como también la Simulación del enlace.

En primer lugar se tomó en cuenta que las planificaciones de capacidad y de cobertura, para ésta tecnología, tienen una fuerte relación con la calidad y grado de servicio (QoS y GoS). Además la capacidad, a veces, no sólo está limitada a los equipos que se están utilizando, sino también por falta de bandas de frecuencias.

Se le pueden dar distintos enfoques a la planificación de capacidad, se puede planificar de modo de obtener niveles de calidad de servicio óptimos, lo cual llevará a sobredimensionar la red, también se podría realizar considerando unos cuantos servicios, o planificar de acuerdo a la cobertura que se desea ofrecer. Por tales motivos se decidió realizar la planificación de la cobertura y capacidad con una orientación de procesos que mezclara de cierta forma los enfoques anteriormente mencionados, para lograr, de éste modo, los resultados deseados y organización en la obtención de los mismos.

A continuación se muestra un diagrama de flujo de procesos que representa la planificación de capacidad y cobertura de la red.

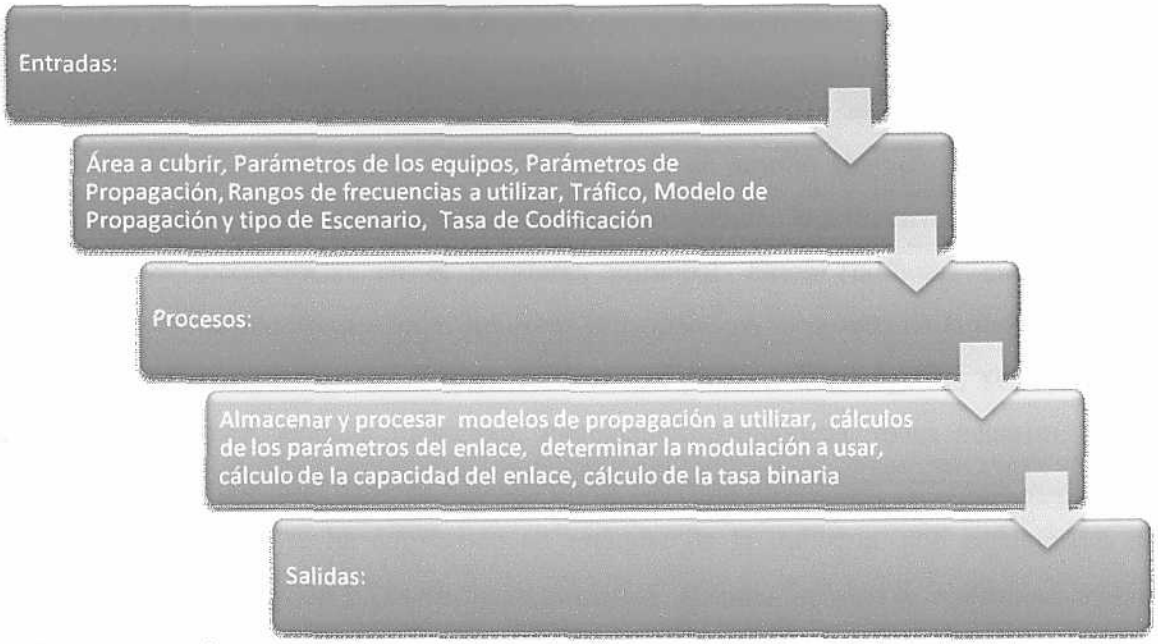


Figura 16. Diagrama de flujo del proceso de planificación de capacidad
Fuente: Elaboración Propia

Como siguiente paso al proceso de diseño se seleccionó un software apropiado para la elaboración del programa de cálculo y la simulación del enlace WIMAX. Como ambiente de desarrollo se eligió Matlab R2006a, para la elaboración de la Herramienta de cálculo, y para la simulación se eligió Radio Mobile 7.5.7.

Se eligió Matlab (*Matrix Laboratory*) por ser una poderosa herramienta de cálculo, simulación y modelado matemático. MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son

expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional.

MATLAB dispone también en la actualidad de un amplio abanico de programas de apoyo especializados, denominados *Toolboxes*, que extienden significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos *Toolboxes* cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y la simulación, destacando entre ellos el '*toolbox*' de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, redes neurales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc. es un entorno de cálculo técnico, que se ha convertido en estándar de la industria, con capacidades no superadas en computación y visualización numérica. (García de Jalón & Rodríguez, 2005).

De forma coherente integra los requisitos claves de un sistema de computación técnico: cálculo numérico, gráficos, herramientas para aplicaciones especificas y capacidad de ejecución en múltiples plataformas.

Por tales razones se considera a Matlab un programa confiable, disponible, cuenta con los recursos necesarios para la realización de la Herramienta de Cálculo, y se tomó en cuenta como primera opción en el proceso de diseño, además se escogió la versión R2006 por ser una de las versiones más recientes del mismo.

En cuanto a la Simulación se hará con dos programas en conjunto, el primero sigue siendo el ambiente de trabajo Matlab R2006 y en segundo lugar, y bajo un trabajo de selección bastante largo, se escogió el software de simulación RadioMobile 7.5.7, entre las razones que llevaron a su elección se encuentra la posibilidad de ubicación geográfica de casi cualquier coordenada a nivel mundial, la posibilidad de verificación de línea de vista

del enlace, los perfiles trazados por el mismo y como última, pero tal vez la razón de mayor peso, es el software utilizado por el ente regulador de las Telecomunicaciones en Venezuela, CONATEL, en la planificación de redes inalámbricas.

Como tercer paso se procedió a la programación de la Herramienta de cálculo y planificación de capacidad para una red fija basada en WIMAX. Cabe destacar que la Herramienta de cálculo fue realizada mediante Programación Estructurada y Secuencial

El cuarto paso es realizar el estudio de la influencia de la separación entre la estación base y la estación suscriptora mediante los datos obtenidos con la Herramienta y la información recopilada a lo largo de la presente investigación,. Dicho estudio se hará comparando los resultados que arroje el programa y buscando un posible patrón de comportamiento del enlace a diferentes distancias.

Por último se realizó un manual de usuario para la Herramienta de dimensionamiento que puede ser vista y estudiada en el Apéndice A.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos, describiendo cada uno de ellos, respondiendo a la metodología y objetivos planteados.

IV.1 HERRAMIENTA DE DIMENSIONAMIENTO

Como resultado se obtuvo un programa que no sólo calcula parámetros de un radioenlace, sino que también representa una Herramienta de dimensionamiento para una red fija basada en el estándar IEEE 802.16d.

A continuación se muestra en la figura 17 los resultados obtenidos por la Herramienta anteriormente mencionada, para un caso de estudio particular, cuyas características más resaltantes son: Potencia de transmisión 3mW, Ganancia de las antenas (transmisora y receptora) 18dBi, Figura de Ruido 2dB, Banda de frecuencia en la cual se trabajará 3.5GHz, Ancho de Banda de recepción 10MHz, Tráfico 40Mbps, Distancia del Enlace 20Km y como Modelo de Propagación se utilizará el Modelo de Propagación en el Espacio Libre.

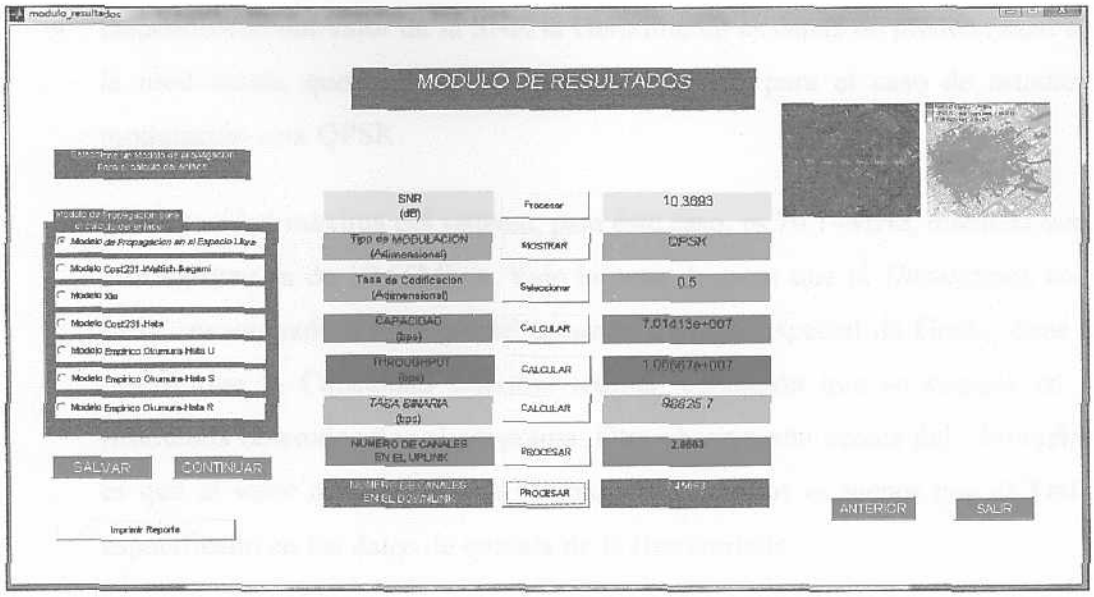


Figura 17. Ejemplo de los Resultados de la Herramienta para un caso de estudio
Fuente: Elaboración Propia

Cabe destacar que la tasa de codificación usada fue de 1/2, lo cual significa que por cada bit que entra al codificador salen 2. También es necesario comentar que la capa física tomada para el cálculo de los números de canales fue ODFM.

Al analizar los resultados obtenidos se puede observar que:

- La SNR depende, en gran medida, del modelo de propagación a utilizar, pues es él quien predice las pérdidas en el camino que son tomadas en cuenta a la hora de calcular la potencia de recepción. Por tanto, al observar el valor arrojado por la Herramienta, se puede concluir que, para éste caso, la potencia recibida era próxima al valor de la potencia del ruido.

- Dependiendo del valor de la SNR la Herramienta es capaz de predecir cuál será la modulación que usará la tecnología WIMAX, para el caso de estudio la modulación será QPSK.

- La Capacidad máxima del sistema, para éste caso, es 70.14MHz, mientras que el *Throughtput* es de 10,66Mbps. Vale la pena destacar que el *Throughput*, como se ha mencionado a lo largo del presente Trabajo Especial de Grado, debe ser menor que la Capacidad Máxima teórica, condición que se cumple en los resultados obtenidos por el programa. Otra observación acerca del *Throughput*, es que el valor mostrado en la ventana de resultados es menor que el Tráfico especificado en los datos de entrada de la Herramienta.

- La Tasa Binaria es de 98.6Kbps, a cual representa la velocidad de transmisión del canal

- El número de subcanales en los cuales se puede subdividir tanto el canal de subida como el de bajada, para el caso de estudio, es de 2 subcanales cada uno. Tomando en cuenta que el canal de subida o *Uplink* tiene más capacidad que el canal de bajada o *DownLink*. Para el caso de estudio (sólo para el enlace perteneciente al ejemplo tomado) se podría decir, que en el peor de los casos, el sistema tendría 4 usuarios simultáneamente en transmisión; considerando que ello ocurre con una duración de tiempo bastante corto y comúnmente en las horas pico del día, en donde el circuito puede mantenerse continuamente ocupado y cursa un tráfico de aproximadamente un Erlang.

Adicionalmente se presenta dos tablas comparativas para los siguientes casos (respectivamente):

Caso 1: Datos

Potencia de Transmisión (Pt): 3mW

Ganancia de la Antena Receptora (Gr): 18dBi

Figura de Ruido (NF): 2dB

Tráfico (Tf): 40Mbps

Perdidas en los terminales (Lt): 1dB

Frecuencia de la Portadora (fc): 100MHz

Ganancia de la Antena Transmisora (Gt): 18dBi

Altura de la Estación Suscriptora (hMS)= 10m

Distancia hBS – hMS = 12Km

Altura de la Estación Base (hBS)= 30m

Distancia del Enlace (d): 23Km

Ancho de Banda (BW): 10MHz

Banda de Frecuencia a trabajar (f): 3.5GHz

Caso 1: Datos

Potencia de Transmisión (Pt): 3mW

Ganancia de la Antena Receptora (Gr): 18dBi

Figura de Ruido (NF): 2dB

Tráfico (Tf): 40Mbps

Perdidas en los terminales (Lt): 1dB

Frecuencia de la Portadora (fc): 100MHz

Ganancia de la Antena Transmisora (Gt): 18dBi

Altura de la Estación Suscriptora (hMS)= 10m

Distancia hBS – hMS = 12Km

Altura de la Estación Base (hBS)= 30m

Distancia del Enlace (d): 23Km

Ancho de Banda (BW): **5MHz**

Banda de Frecuencia a trabajar (f): **5.8GHz**

CUADRO COMPARATIVO CASO 1:

Modelo / ámetro	Propagación en el Espacio Libre	Cost231-Walfisch-Ikegami	Xia			Cost231-Hata		Okumura-Hata Urbano	Okumura-Hata Suburbano	Okumura-Hata Rural
			A	B	C	0	3			
Loss (dB)	130,616	110,659	152.167	145.084	-1.83275	146.969	147.969	132.558	126.547	109.158
R (dB)	9,15529	29,1125	12.396	5,31241	141,604	7,19789	8,19789	7,21332	13,2246	30,6133
ulación	BPSK	64-QAM	BPSK	=	64-QAM	BPSK	BPSK	BPSK	QPSK	64-QAM
dad (bps)	6,688*10^7	9,825*10^7	7.487*10^7	5.3*10^7	1,43*10^8	6,071*10^7	6,402*10^7	6,076*10^7	7,660*10^7	9,965*10^7
iput (bps)	1,066*10^7	8,00*10^6	1,067*10^7	1,06*10^7	8*10^6	1,066*10^7	1,066*10^7	1,066*10^7	1,066*10^7	8*10^6
OFDM	98625,7	98625,7	98625,7	98625,7	98625,7	98625,7	98625,7	98625,7	98625,7	98625,7
OFDM A	96612,9	96612,9	96612,9		96612,9	96612,9	96612,9	96612,9	96612,9	96612,9
mero de les en el plink	2,8663	2,8663	2,8663	2,8663	2,8663	2,8663	2,8663	2,8663	2,8663	2,8663
mero de les en el nwlink	2,45683	2,45683	2,45683	2,45683	2,45683	2,45683	2,45683	2,45683	2,45683	2,45683

Tabla 4. Comparación de Resultados de Modelos de Propagación 1

Fuente: Elaboración Propia

Modelo Xia:

A= Antenas de estación base próximas al nivel medio de los edificios

B= Antenas de estación base por encima del nivel medio de los edificios

C= Antenas de estación base por debajo del nivel medio de los edificios

CUADRO COMPARATIVO CASO 2:

delo / metro	Propagación en el Espacio Libre	Cost231-Walfisch-Ikegami	Xia			Cost231-Hata		Okumura-Hata Urbano	Okumura-Hata Suburbano	Okumura-Hata Rural
			A	B	C	0	3			
oss (dB)	135,003	110,659	152,167	145,084	-1,83275	146,969	147,969	132,558	126,547	109,158
(dB)	0,221604	24,123	17,3847	10,3021	136,614	12,1876	13,1876	2,224	8,23489	25,6236
ilación	-	64-QAM	16-QAM	QPSK	64-QAM	QPSK	QPSK	-	BPSK	64-QAM
ad (bps)	2,887*10^6	4,651*10^7	4,201*10^7	3,49*10^7	7,104*10^7	3,721*10^7	3,827*10^7	1,688*10^7	3,207*10^7	4,734*107
ghput ps)	8*10^6	8*10^6	1,066*10^7	1,06*10^7	8*10^6	1,066*10^7	1,066*10^7	1,066*10^7	1,066*10^7	8*10^6
OFDM	49312,8	49312,8	49312,8	49312,8	49312,8	49312,8	49312,8	49312,8	49312,8	49312,8
OFDM A	48306,4	48306,4	48306,4	48306,4	48306,4	48306,4	48306,4	48306,4	48306,4	48306,4
ero de s en el link	5,73261	5,73261	5,73261	5,73261	5,73261	5,73261	5,73261	5,73261	5,73261	5,73261
ero de s en el wlink	4,91366	4,91366	4,91366	4,91366	4,91366	4,91366	4,91366	4,91366	4,91366	4,91366

Tabla 5. Comparación de Resultados de Modelos de Propagación 2
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Xia:

A= Antenas de estación base próximas al nivel medio de los edificios

B= Antenas de estación base por encima del nivel medio de los edificios

C= Antenas de estación base por debajo del nivel medio de los edificios

De ambos cuadros se puede observar que:

- El modelo que permite el uso de modulaciones de alto nivel, debido a sus predicciones de pérdidas en el trayecto, es Cost231-Walfisch-Ikegami, lo cual proporciona al enlace mayores velocidades.

- Para valores de la SNR o Relación Señal a Ruido menores que 6dB no existe enlace, es por ello que las columnas 3, del primer cuadro comparativo, 1 y 8 del segundo cuadro comparativo están en color rojo, lo que indica que no es factible el uso de dichos modelos (Espacio Libre, Xia B y Okumura-Hata Urbano) en los casos respectivos.
- El Throughput se ve afectado por las pérdidas por el trayecto de manera indirecta, ya que dependiendo de dichas pérdidas la Herramienta seleccionará un tipo de modulación y arrojará las posibles tasas de codificación que se usará en la transmisión, donde dicha tasa afecta directamente a la carga útil de la trama o Throughput.
- La Tasa Binaria depende del ancho de banda de canalización y de la capa física seleccionada, OFDM u OFDMA, por lo que los valores que se observan en la tabla son similares, para una misma capa física, sin importar qué modelo de propagación se haya seleccionado.
- El número de canales en el enlace de subida y en el enlace de bajada depende del ancho de banda del canal, del ancho de guarda de guarda, del ancho de banda total y de la capa física seleccionada (FDM o FDMA) por lo que los resultados que se observan en la tabla variarán con respecto a los factores anteriormente mencionados sin importar el modelo de propagación seleccionado.
- Se puede observar que existen casos extremos, para los resultados de SNR, tanto en Propagación en el Espacio Libre (caso 2), como el modelo Xia C (caso 1 y 2), puesto que para el primer modelo la relación señal a ruido da por debajo del valor mínimo y en el segundo modelo, el resultado obtenido está muy por encima del valor promedio arrojado por los demás métodos. Eso significa que

dichos modelos no pueden ser utilizados en dichos escenarios por restricciones de frecuencia propias de cada uno.

IV.2 Valores Significativos

Además fue posible la elaboración de una tabla que encierra los valores más significativos, obtenidos con la Herramienta, de la relación señal a ruido relacionados con la modulación y la tasa de codificación, dicha tabla se muestra a continuación:

Modulación	Tasa de Codificación	SNR en dB
BPSK	½	6.4
QPSK	½	9.4
	¾	11.2
16-QAM	½	16.4
	¾	18.2
64-QAM	2/3	22.7
	¾	24.4

Tabla 6. Resumen de resultados de los valores de SNR para cada modulación
Fuente: Elaboración Propia

Adicional a lo anteriormente expuesto, resulta necesario destacar que la influencia que ejerce la distancia entre la estación base y la estación suscriptora en el enlace es la variación de todos los valores, esto es, varía la relación señal a ruido por ende la modulación, la tasa de codificación, varía también la velocidad y como consecuencia la Calidad del enlace.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al culminar la investigación vale la pena resaltar como uno de los grandes logros el aporte que se hace en información técnica acerca de la tecnología WIMAX, sus principales características y ventajas. Adicionalmente es posible contestar la interrogante que dio origen al presente Trabajo Especial de Grado: ¿cuál es el número máximo de usuarios que soporta una red basada en el estándar IEEE 802.16d? La respuesta es muy sencilla, y es "Depende". Si, depende de las condiciones del enlace, de las especificaciones de los equipos y las características del medio; una vez obtenidos dichos datos será posible ingresarlos en la Herramienta de Cálculo, también considerada como Herramienta de Dimensionamiento, y arrojará el valor de la Capacidad del enlace para dichas características.

El comportamiento del enlace a medida que aumenta o disminuye la distancia entre la estación base y la estación suscriptora es activar el proceso de modulación adaptativa escogiendo la más adecuada para el caso; ligado a éste hecho varía la relación señal a ruido o SNR y por ende la tasa de codificación a usar. Dado que los resultados anteriormente mencionados son datos de entrada para el cálculo de la capacidad, ésta también variará con la distancia.

Gracias a los valores obtenidos en los cálculos realizados por la herramienta de dimensionamiento, se pudo observar lo siguiente:

- Un enlace WIMAX puede alcanzar distancias de hasta 50Km bajo condiciones especiales.

- Es importante la modulación adaptativa porque se disponen de varios niveles de modulación que facilitan la propagación de la señal de información en el aire a grandes distancias. Ordenan el radioespectro distribuyendo canales a cada información distinta. Disminuyen dimensiones de antenas. Optimizan el ancho de banda de cada canal. Evitan interferencia entre canales. Protegen a la información de las degradaciones del ruido. Definen la calidad de las informaciones transmitidas

- La máxima velocidad de transmisión se obtiene en la menor distancia posible entre la estación base y la estación suscriptora.

- El mínimo valor de la relación señal a ruido que permite un nivel de la señal aceptable para establecer el enlace es de 6dB.

- Gracias al tiempo de símbolo OFDM, la forma de onda OFDM elimina los problemas de interferencia inter simbólica (ISI).

- Los modelos fisicos brindan información detallada del terreno, de la agrupación de celdas y de las edificaciones circundantes, lo que los hace muy apropiados a la hora de planificar el dimensionamiento de una red WIMAX.

Adicionalmente a las conclusiones expuestas se pueden destacar las ventajas que la Tecnología WIMAX posee en comparación a otros medios de transmisión:

- Ofrece acceso inalámbrico de banda ancha al usuario final.

- Resulta más económico que una infraestructura cableada.

- Posee un elevado rendimiento por su robusto esquema de modulación.

- Aumenta la densidad espectral
- Posee Escalabilidad ya que soporta canales con ancho de banda flexibles
- Y Ofrece tanto Calidad de Servicio (QoS) al usuario como Seguridad.

RECOMENDACIONES

Dado que el valor de Capacidad, obtenido por la Herramienta, depende de los datos de las estaciones transmisora y receptora, de los datos del terreno y del medio amiente en donde se realizará el enlace, se recomienda tener bien claros dichos datos para una rápida obtención de resultados.

Dada la variabilidad del enlace a medida que cambia (disminuye o aumenta) la distancia, se recomienda al usuario escoger radios, y en general, equipos que garanticen un buen ancho de banda de recepción debido al comportamiento de dicho enlace por factores tales como la modulación adaptativa.

Se debe recordar que WIMAX alcanza su máxima distancia de cobertura SÓLO bajo condiciones especiales, por lo cual se recomienda al usuario, a la hora de planificar una red con ésta tecnología, tener en cuenta que la capacidad del mismo será baja para distancias de hasta 50Km.

Para valores de SNR menores de 6dB no es posible establecer un enlace WIMAX, por lo cual, si al realizar los cálculos tanto con la Herramienta como por otros medios se obtiene como resultado un valor similar o menor para la SNR, se recomienda seleccionar otro modelo predictivo que permita elevar dicha SNR o cambiar algunos de los parámetros de entrada para que sean más acordes al enlace deseado.

Si el usuario desea grandes tasas de transmisión a altas velocidades debe considerar escoger una distancia moderada entre antenas (BS y SS) para obtener los resultados deseados. Además de ello, el usuario tiene que tener en cuenta que a grandes distancias menor es el nivel de modulación y por tanto menores son las velocidades.

Resulta importante tener bien claro las condiciones del entorno donde se desee establecer un enlace WIMAX para poder elegir el modelo predictivo que mejor se adecúe al caso.

A la hora de planificar una red resulta conveniente tomar en cuenta las ventajas que posee WIMAX sobre otras tecnologías de última milla

BIBLIOGRAFÍA

- Martin, J.(1978). *Communications Satellite Systems.* Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Tomasi, W.(1987). *Advanced Electronic Communications Systems.* Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Rappaport, T. (1996). *Wireless Communications – Principles and Practice.* Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Marcano, D. (2006). WiMAX: Acceso Inalámbrico Banda Ancha. Caracas: Funindes-Universidad Simón Bolívar.
- Foro WIMAX (2006). *Mobile WIMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation.* [Documentación en línea], disponible en: http://www.wimaxforum.org
- Foro WIMAX (2007). *Compatibility of services using WIMAX Technology with Satellite Services in the 2.3-2.7GHz and 3.3-3.8GHz Bands.* [Documentación en línea], disponible: http://www.wimaxforum.org
- IEEE (2001). *IEEE Std.802.16-2001. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.* [Documentación en Línea], disponible en: http://www.ieee.org/web/standards/home
- IEEE (2004). *IEEE Std. 802.16-2004. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.* [Documentación en Línea], disponible en: http://www.ieee.org/web/standards/home

- IEEE (2006). *IEEE Std. 802.16-2005. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems - Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands*.[Documentación en Línea], disponible en:

  http://www.ieee.org/web/standars/home/index.html

- ETSI (2005). BRAN (*Broadband Radio Access Networks); High Performance Radio Local Area Network. Type 1*.[Información técnica en línea]. Disponible en: http://portal.etsi.org/radio/HiperLAN/HiperLAN.asp

- Vanderlei, A (2002). Modelado computacional de canales de comunicación móvil. [Artículo en Línea], disponible en:

  http://www.uel.br/pessoal/taufik/pdf_files/TCCVanderlei2002.pdf

APÉNDICE A

Herramienta de Cálculo de la Capacidad de una Red fija basada WIMAX IEEE 802.16d - Manual de Usuario

A continuación se presentan las diferentes fases de la Herramienta de dimensionamiento desarrollada a lo largo del presente Trabajo Especial de Grado:

PRIMERA PANTALLA: PRESENTACIÓN

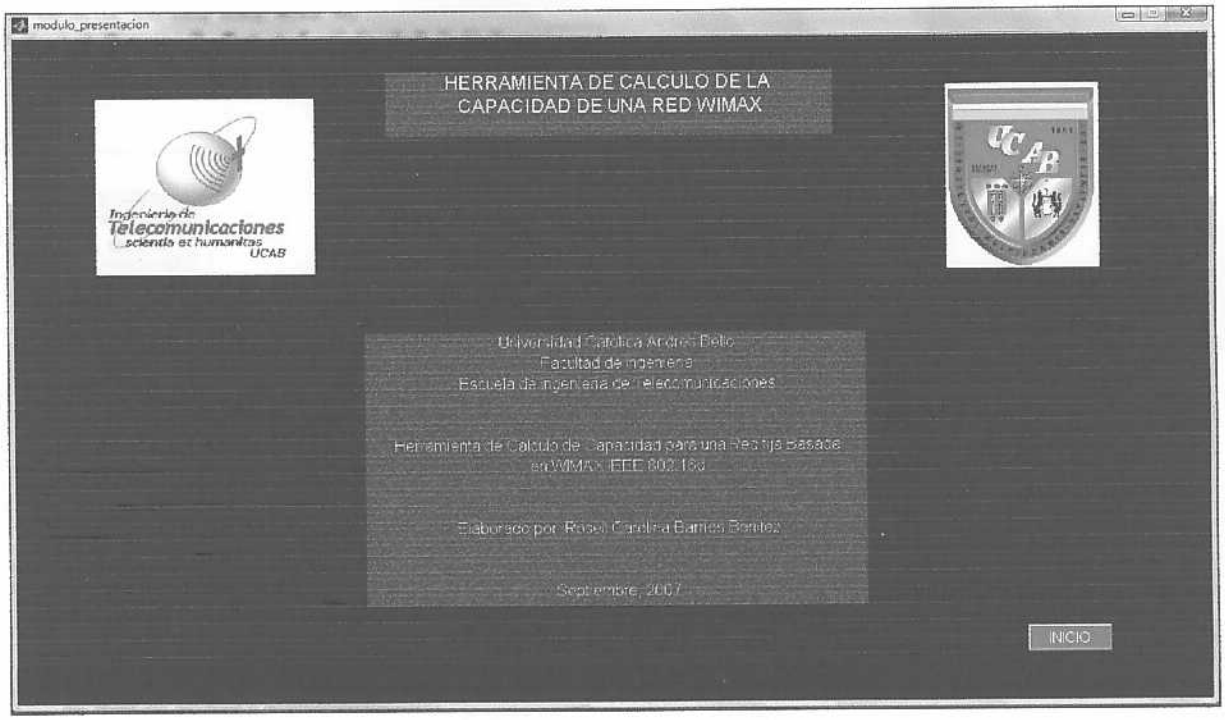


Figura 18. Pantalla de Presentación de la Herramienta de Cálculo de la Capacidad para una red fija basada en WIMAX IEEE 802.16d
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 11 se observa la pantalla de inicio o presentación de la Herramienta de cálculo en donde se observa la identificación de la misma, nombre de la autora, nombre y logo de la Universidad en donde fue desarrollada dicha Herramienta y fecha de culminación.

Al hacer click en el botón de inicio se abre el Modulo Transmisor de la Herramienta como se muestra a continuación, en la figura 12

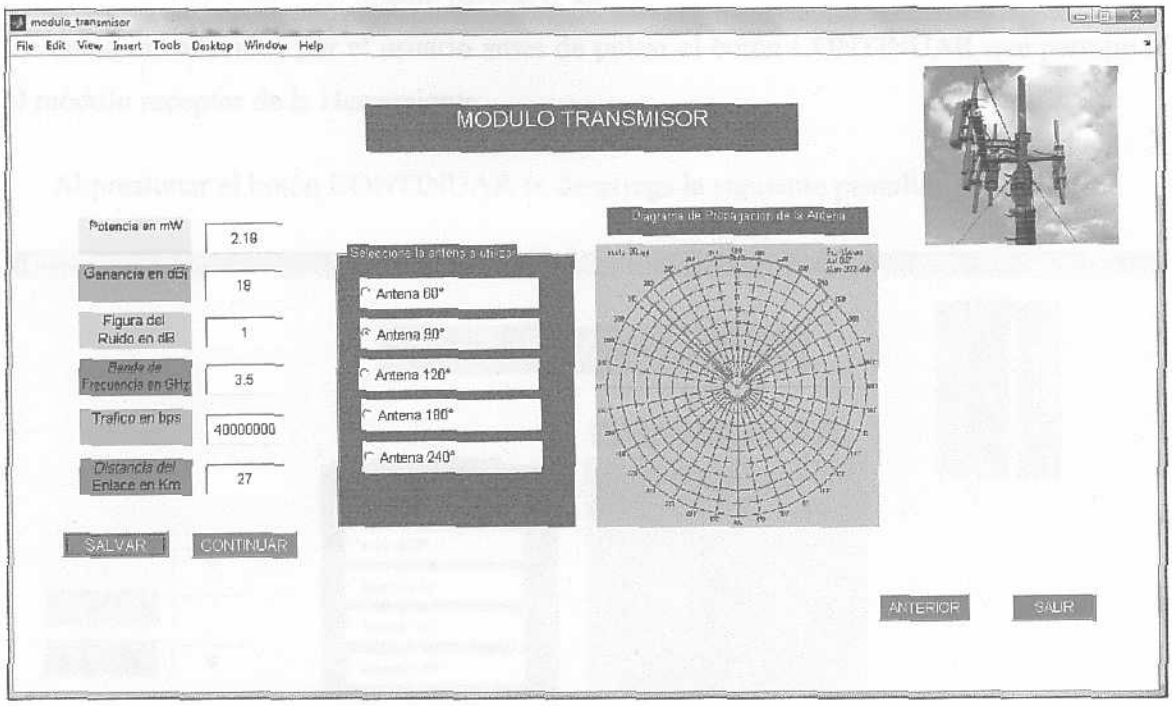


Figura 19. Modulo Transmisor
Fuente: Elaboración Propia

En éste modulo el usuario ingresa los datos de la estación transmisora, tales como Potencia de Transmisión, Ganancia de la antena, figura de ruido, el tráfico que se desea tener, la banda de frecuencias en la cual se va a trabajar y la distancia del enlace.

También se puede elegir el tipo de antena sectorial que se desea utilizar, recordando que para la tecnología WIMAX se utilizan arreglos de antenas sectoriales para cubrir los 360°, así por ejemplo, los arreglos pueden ser 3 antenas sectoriales de 120° cada una, 4 antenas sectoriales de 90° cada una o 6 antenas sectoriales de 60° cada una.

Además, se pueden observar botones que permiten regresar a la pantalla de inicio (ANTERIOR), guardar los datos ingresados (SALVAR), proseguir con el programa (CONTINUAR) o salir del mismo (SALIR). Es importante destacar que se deben SALVAR los datos introducidos por el usuario antes de pulsar el botón CONTINUAR que permite ir al módulo receptor de la Herramienta.

Al presionar el botón CONTINUAR se despliega la siguiente pantalla:

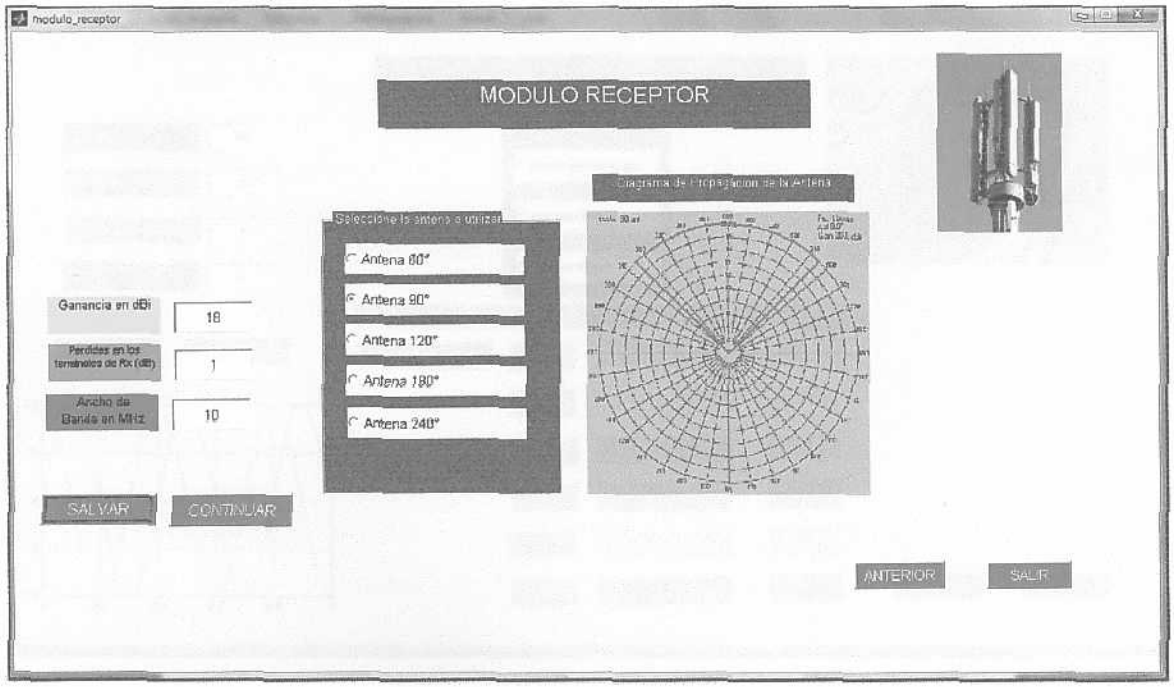


Figura 20. Modulo Receptor
Fuente: Elaboración Propia

En el módulo receptor, tal y como su nombre lo indica, el usuario introduce los datos de la estación receptora, tales como la ganancia de la antena receptora, las perdidas en los

terminales de recepción y el ancho de banda de recepción. Adicionalmente se puede seleccionar el tipo de antena sectorial a utilizar.

De igual modo que en el módulo transmisor, se deben salvar los datos introducidos presionando el botón SALVAR para poder seguir adelante con el programa.

Al presionar el botón continuar se puede observar la siguiente pantalla:

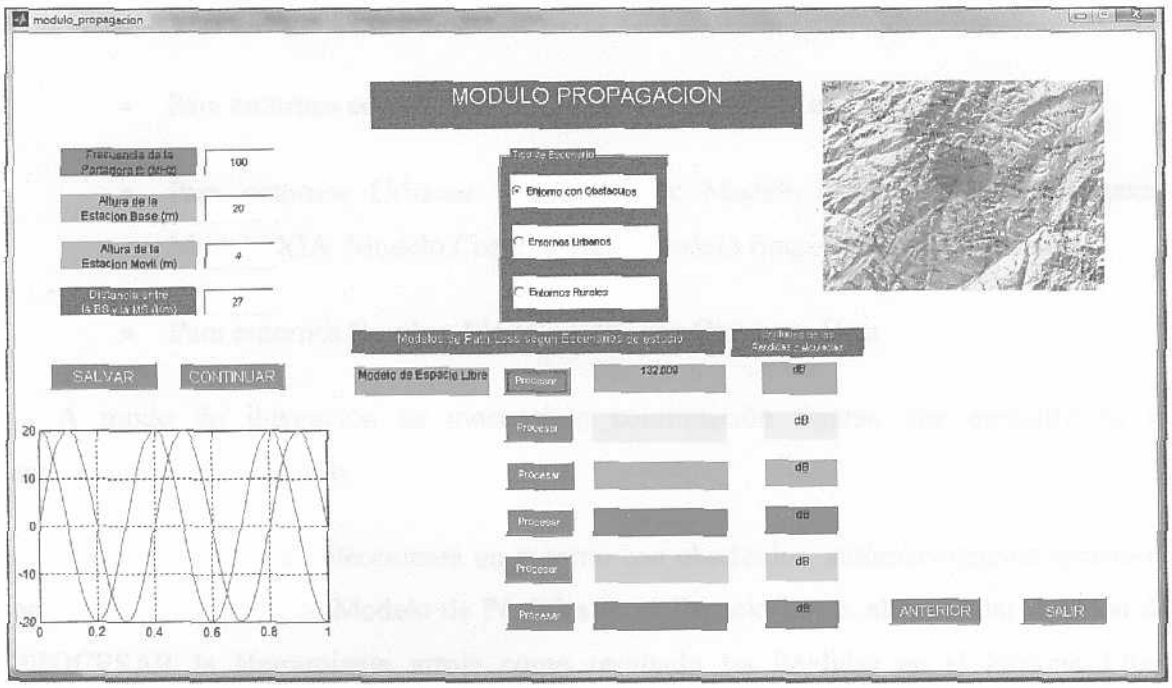


Figura 21. Modulo de Propagación
Fuente: Elaboración Propia

Para ésta parte de la Herramienta se presentan una serie de opciones al usuario que le permiten conocer y planificar el modelo de propagación a utilizar, así como también le permite ingresar datos referentes a la altura de la estación base y la estación móvil, distancia entre ellas y la frecuencia de la portadora. Como en los módulos anteriores, es

importante guardar los datos introducidos al igual que la opción del modelo de propagación seleccionada presionando el botón SALVAR.

Resulta importante destacar que éste modulo presenta al usuario una serie de opciones nuevas hasta ahora, las cuales son referidas tanto al tipo de escenario en el cual se desea trabajar, ya sean escenarios con obstáculos, urbanos o rurales, como el modelo de propagación con el cual se desean realizar los cálculos del enlace. Los modelos de propagación presentados en el presente módulo son:

- Para entornos con obstáculos: Modelo de Perdidas en el Espacio Libre
- Para entornos Urbanos y Suburbanos: Modelo Cost231-Walfisch-Ikegami, Modelo XIA, Modelo Cost231-Hata, Modelo Empírico Okumura-Hata
- Para entornos Rurales: Modelo Empírico Okumura-Hata

A modo de ilustración se mostrará a continuación figuras que ejemplifican lo anteriormente mencionado.

En primer lugar se seleccionará un entorno con obstáculos, automáticamente aparecerá en pantalla la opción de Modelo de Pérdidas en el Espacio Libre, al presionar el botón de PROCESAR la Herramienta arroja como resultado las Pérdidas en el Espacio Libre calculadas siguiendo el modelo elegido, dichas pérdidas serán usadas en los cálculos posteriores, sí y sólo sí, se presiona el botón SALVAR antes de continuar.

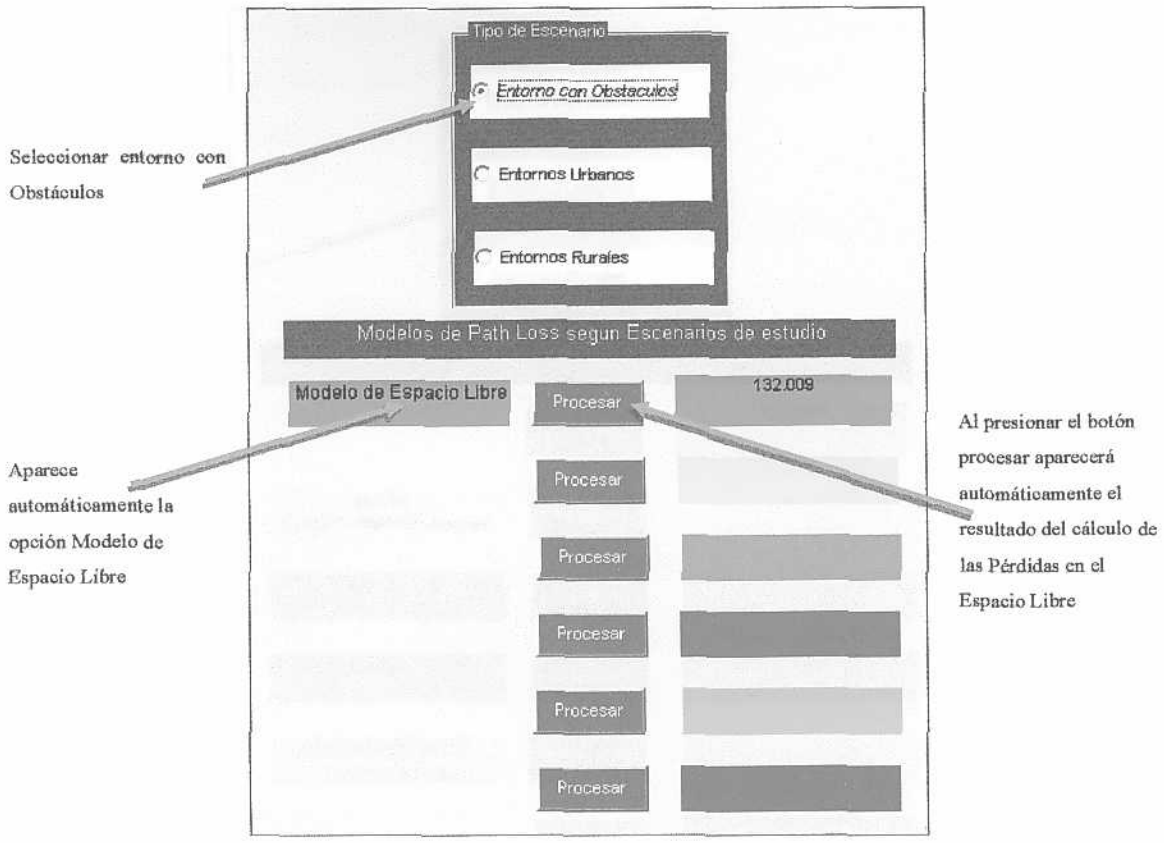


Figura 22. Selección de Entornos con Obstáculos
Fuente: Elaboración Propia

Ahora será seleccionada la opción de Entornos Urbanos y automáticamente aparecerá en pantalla los modelos relacionados con dichos entornos, como se muestra en la siguiente figura.

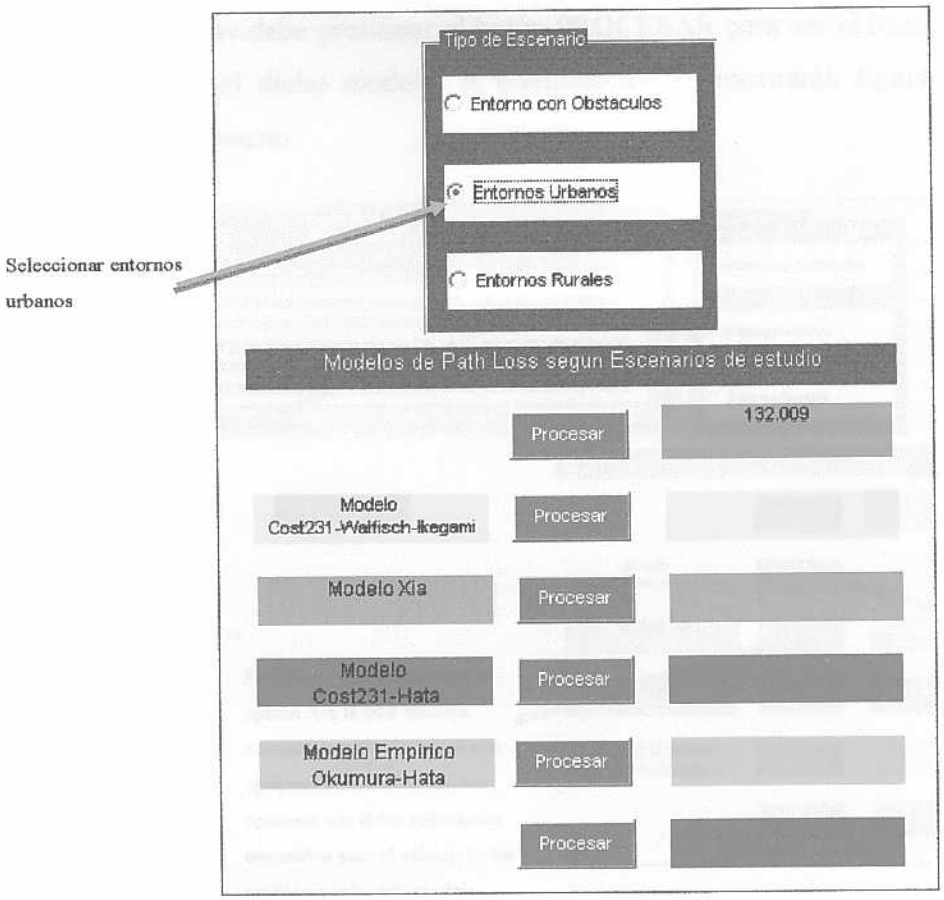


Figura 23. Selección de Entornos Urbanos
Fuente: Elaboración Propia

Al elegir los entornos urbanos se pueden observar los métodos asociados con ese tipo de entorno. Cabe destacar que algunos de ellos, al ser seleccionados presionando el botón PROCESAR mostrarán al usuario otras opciones relacionadas con sus parámetros de entrada, como se verá más adelante en la figura 17. Por último al resaltar la opción de entornos rurales aparecerá el Modelo Empírico Okumura-Hata, y de igual forma que en los

casos anteriores, se debe presionar el botón PROCESAR para ver el resultado que arroja el programa según el dicho modelo. A continuación se mostrarán figuras que ilustran lo anteriormente expuesto.

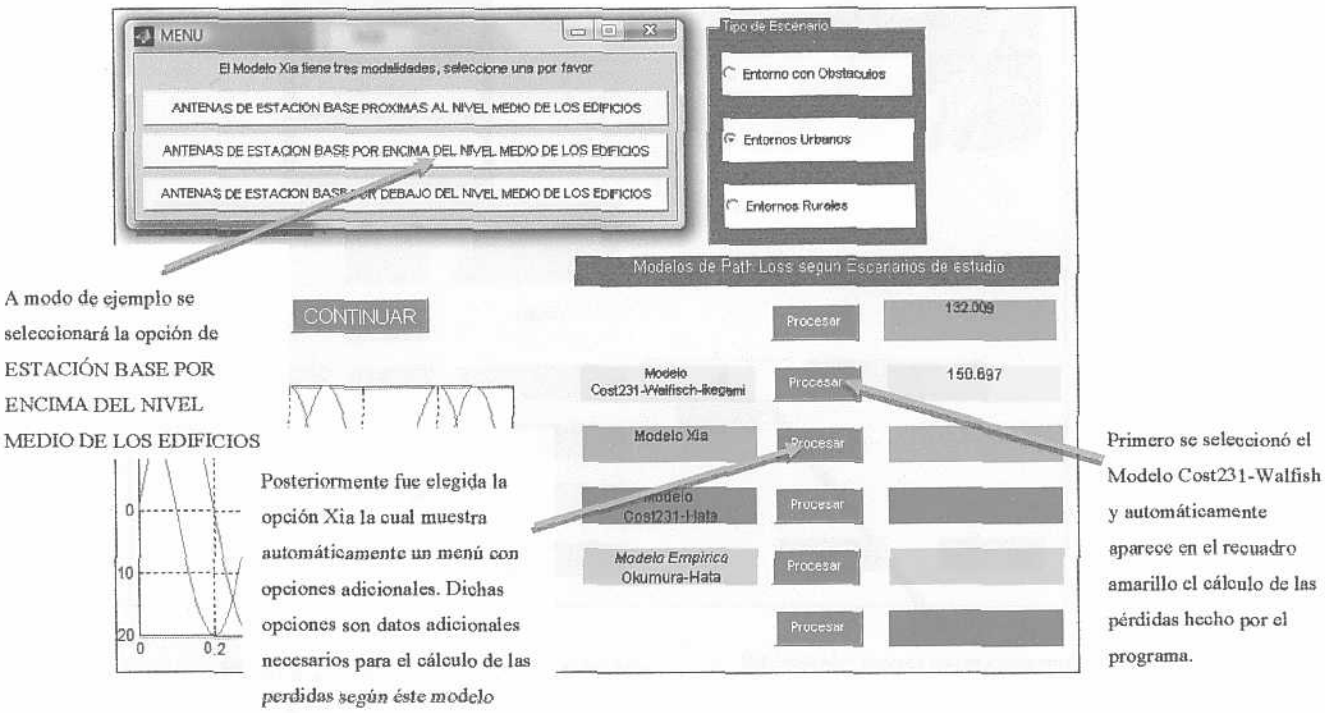


Figura 24. Selección de los Modelos Cost231-Walfisch-Ikegami y Xia
Fuente: Elaboración Propia

Como siguiente paso, luego de seleccionar la opción mostrada en la figura 17, la Herramienta mostrará, del lado derecho de la pantalla, un pequeño recuadro junto con un botón salvar, en dicho recuadro el usuario ingresará la altura promedio de los obstáculos y

seguidamente se guardará el dato presionando el botón salvar. En la siguiente figura se ilustra lo anteriormente mencionado:

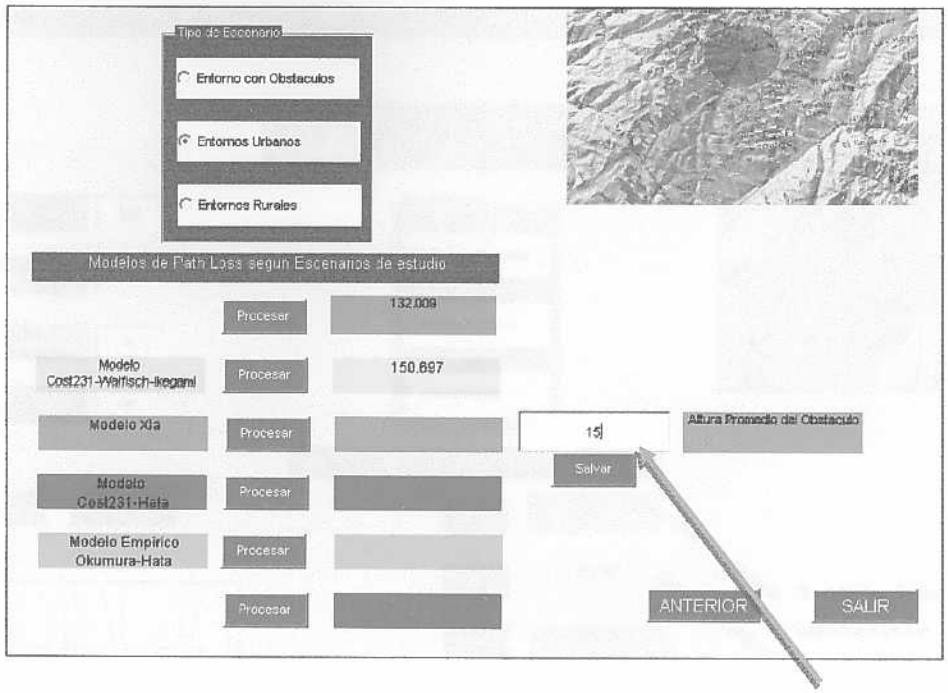


Figura 25. Selección del Modelo Xia
Fuente: Elaboración Propia

Éste recuadro aparece automáticamente al presionar la opción señalada en la figura 17. Una vez escrito el valor hay que salvarlo presionando el botón SALVAR

De manera análoga a los modelos anteriormente seleccionados, se pueden seleccionar los Modelos Cost231-Hata y Okumura-Hata, en donde aparecerán opciones adicionales tanto en el modelo Cost231-Hata como en el modelo Okumura-Hata, en donde al seleccionar una aparecerá en pantalla el resultado del cálculo hecho por el programa.

Por último, para los entornos rurales aparecerá la opción Okumura-Hata y al procesarla aparecerá en pantalla la respuesta que arroja la Herramienta. Es importante destacar que la

Herramienta deja impresa en pantalla los resultados que va obteniendo para posibles anotaciones posteriores que desee realizar el usuario, como se muestra en la figura 19.

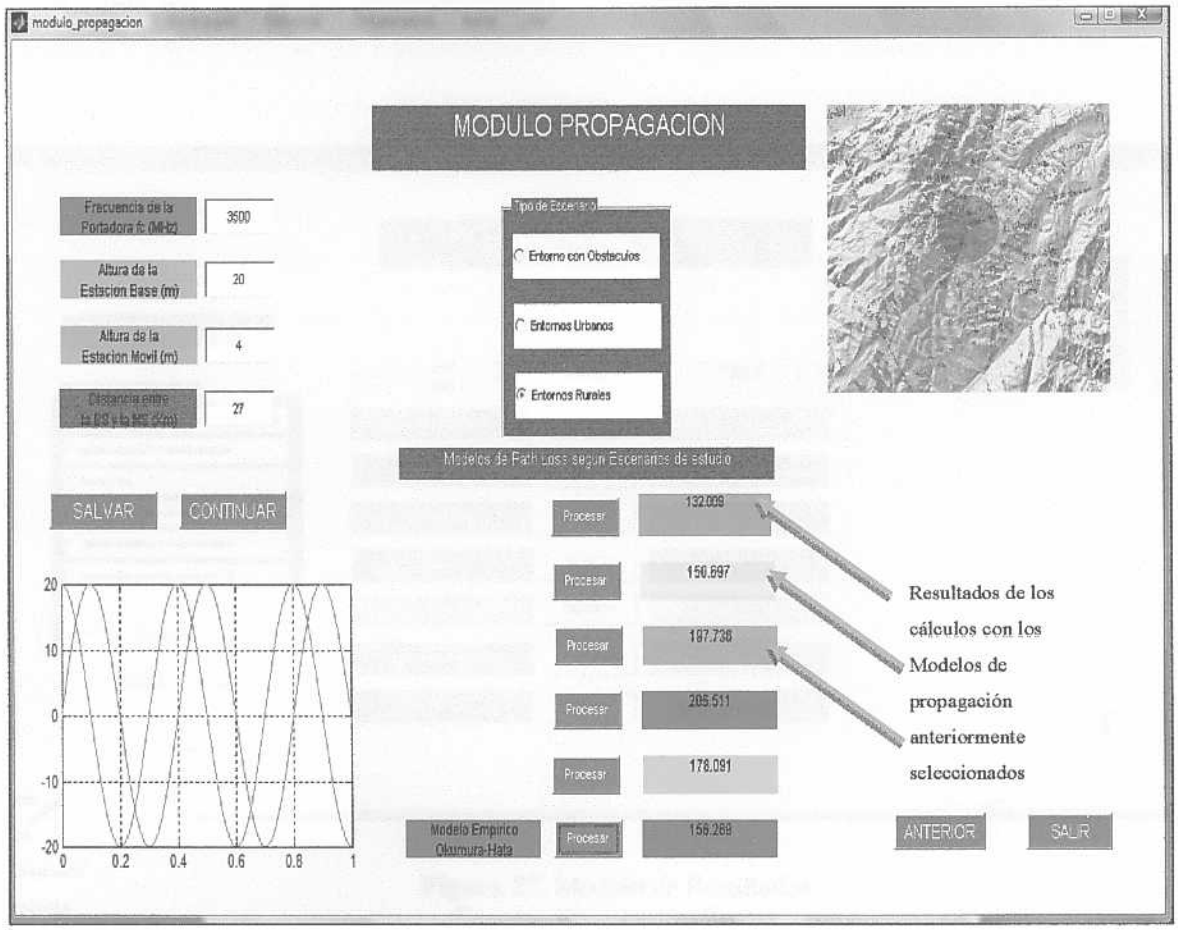
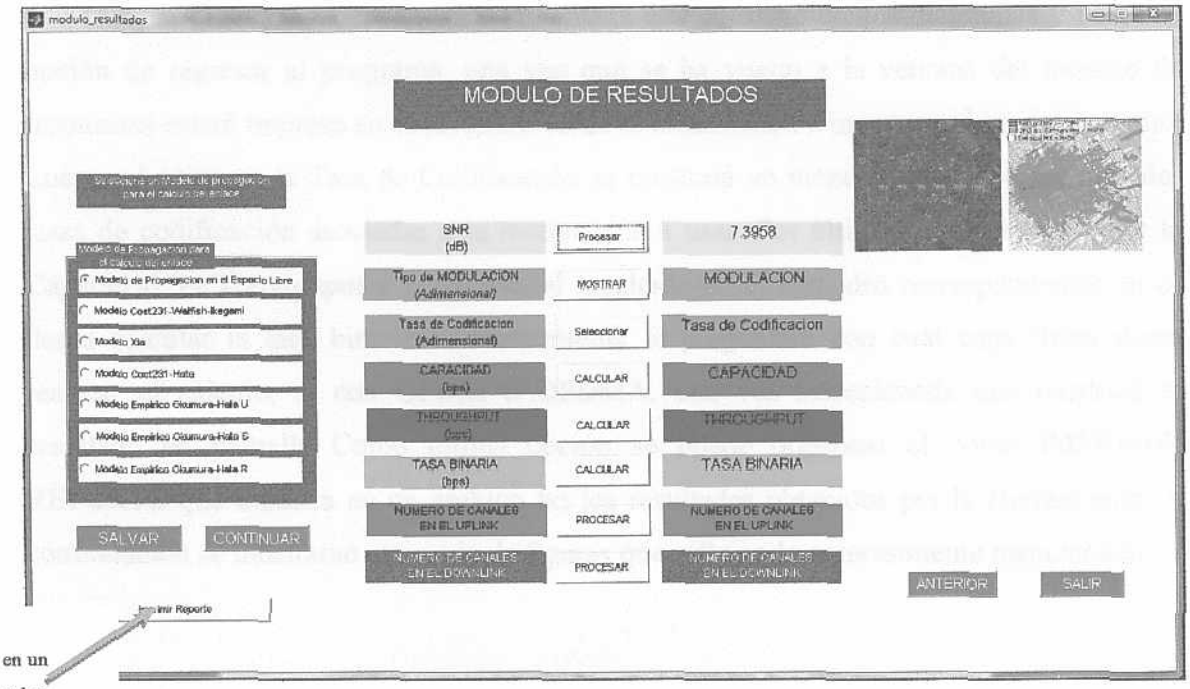


Figura 26. Resultados de los Modelos de Propagación
Fuente: Elaboración Propia

Ahora la Herramienta tiene todos los datos necesarios para continuar, por ello se debe hacer click en el botón CONTINUAR, y seguidamente aparecerá la pantalla que se muestra en la figura 20.



Imprime en un archivo txt los resultados obtenidos por la Herramienta

Figura 27. Módulo de Resultados
Fuente: Elaboración Propia

En el módulo de resultados la Herramienta arroja los valores calculados a lo largo del recorrido del usuario por el programa. Tal y como se muestra en la figura 20 los datos calculados son: la relación señal a ruido (SNR), la Modulación a usar, la Tasa de codificación, la Capacidad Máxima del Sistema, el Throughput, la Tasa Binaria y el Número de canales en un sistema TDMA.

Como primer paso, en éste módulo, se debe seleccionar un Modelo de Propagación y salvar dicha selección. Posteriormente se puede procesar cada una de las opciones que se muestran en pantalla. Al procesar la SNR, aparecerá en el recuadro amarillo el valor calculado. Al procesar la MODULACIÓN, el programa preguntará si desea ver los diagramas de Probabilidad de Error de cada una de las modulaciones empleadas en WIMAX, si dice que SI, se abrirá una ventana que contiene dichos diagramas y posee la opción de regresar al programa, una vez que se ha vuelto a la ventana del módulo de respuestas estará impresa en el recuadro verde la modulación a usar para el caso en estudio. Luego, al procesar la Tasa de Codificación se mostrará un menú que indicará las posibles tasas de codificación asociadas a la modulación a usar. Por último se pueden procesar la Capacidad, el Throughput y mostrarán el resultado en el recuadro correspondiente. Si se desea calcular la tasa binaria la Herramienta le preguntará con cual capa física desea realizar el cálculo, si con OFDM u OFDMA, una vez seleccionada una mostrará el resultado en pantalla Como última opción se puede presionar el botón IMPRIMIR REPORTE que muestra en un archivo txt los resultados obtenidos por la Herramienta. A continuación se mostrarán una serie de figuras que reflejan lo anteriormente mencionado.

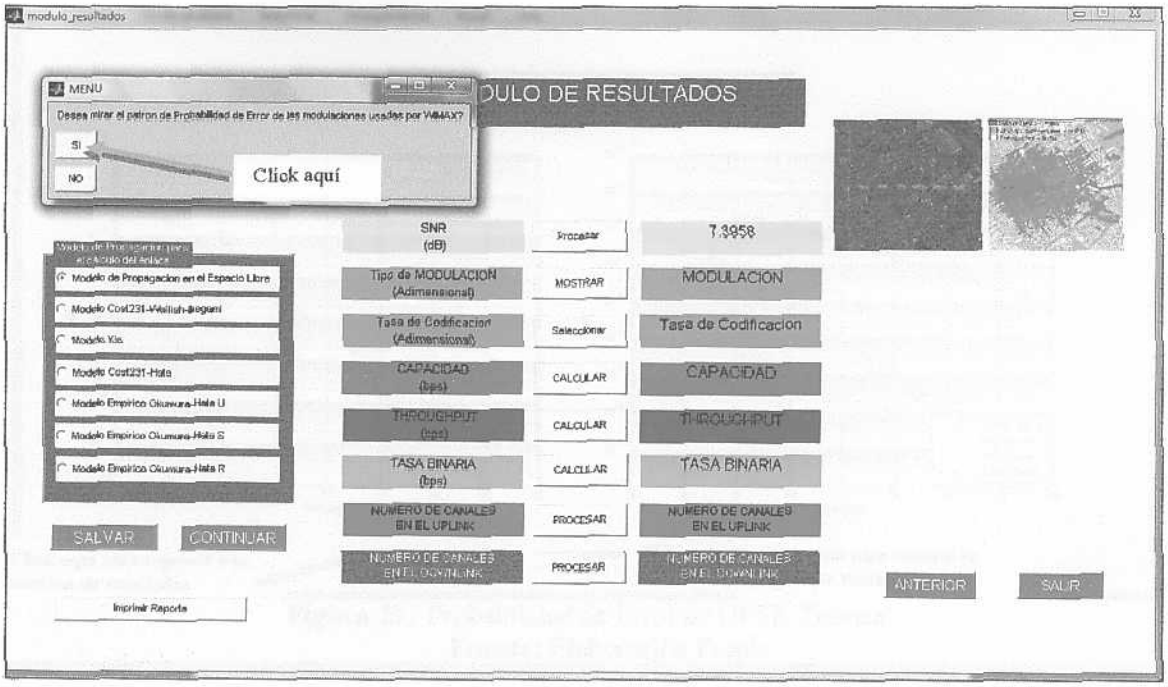


Figura 28. Selección de la Modulación
Fuente: Elaboración Propia

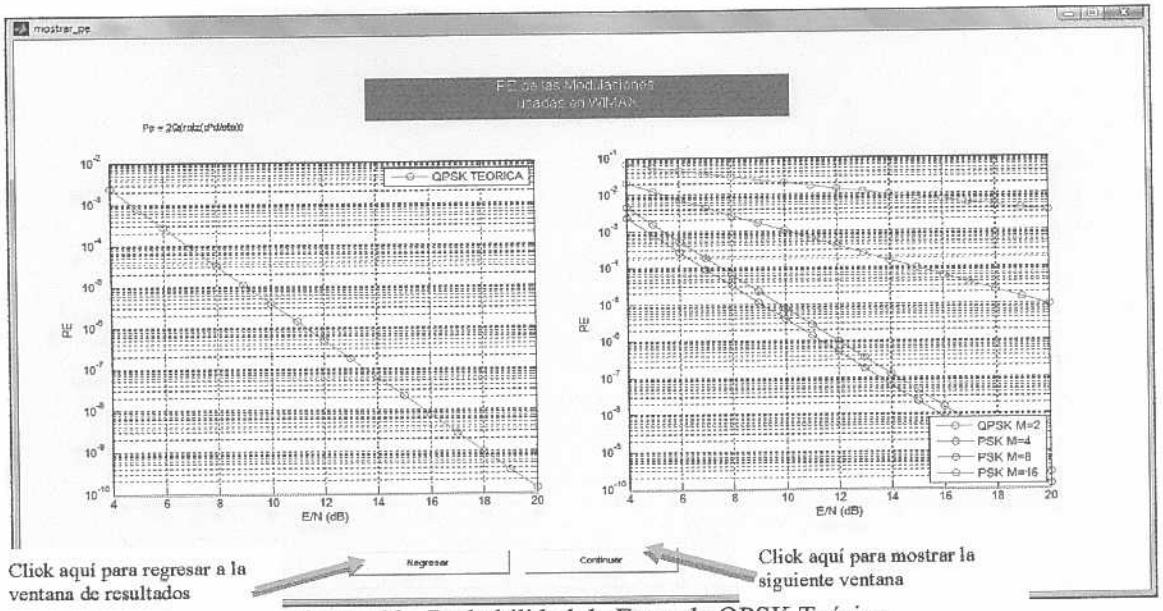


Figura 29. Probabilidad de Error de QPSK Teórica
Fuente: Elaboración Propia

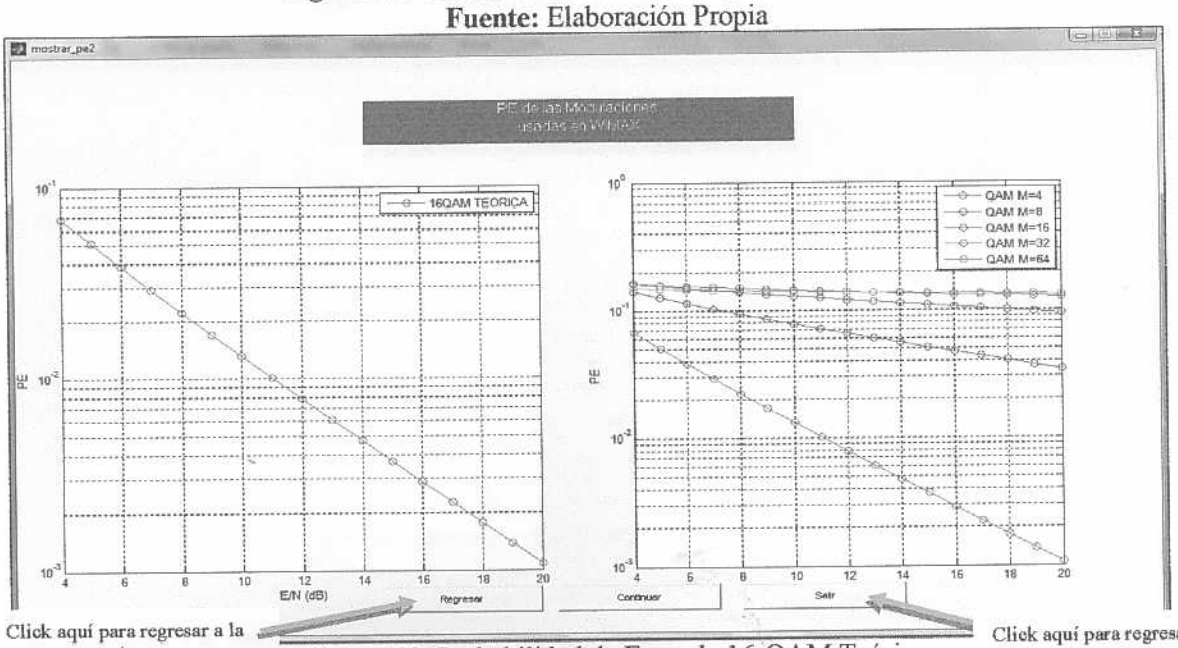


Figura 30. Probabilidad de Error de 16-QAM Teórica
Fuente: Elaboración Propia

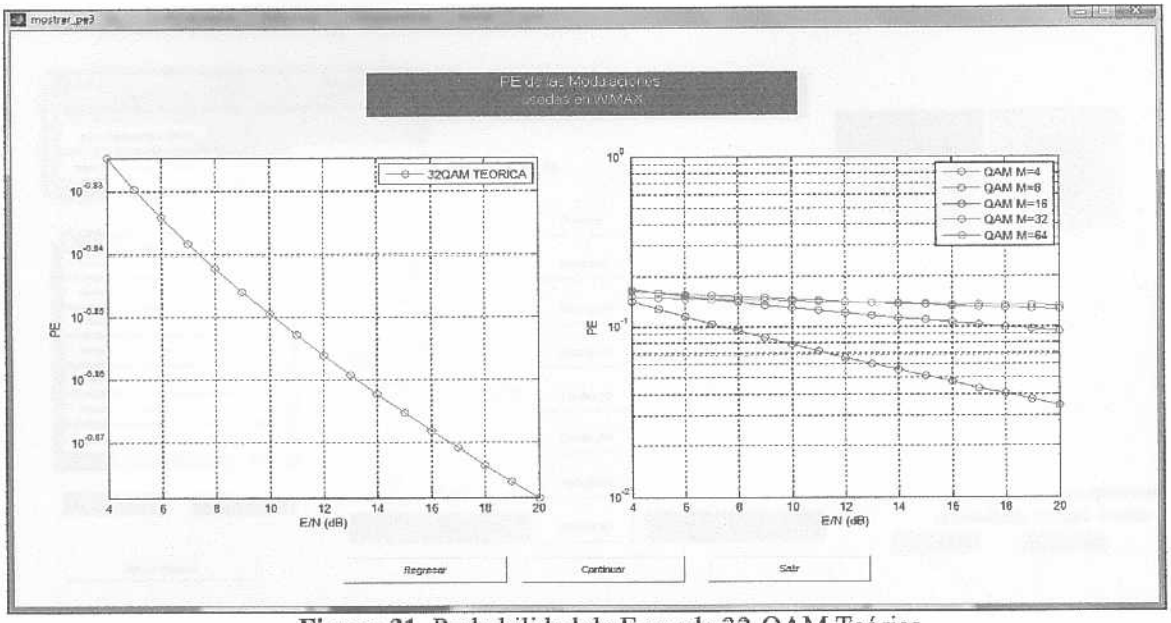
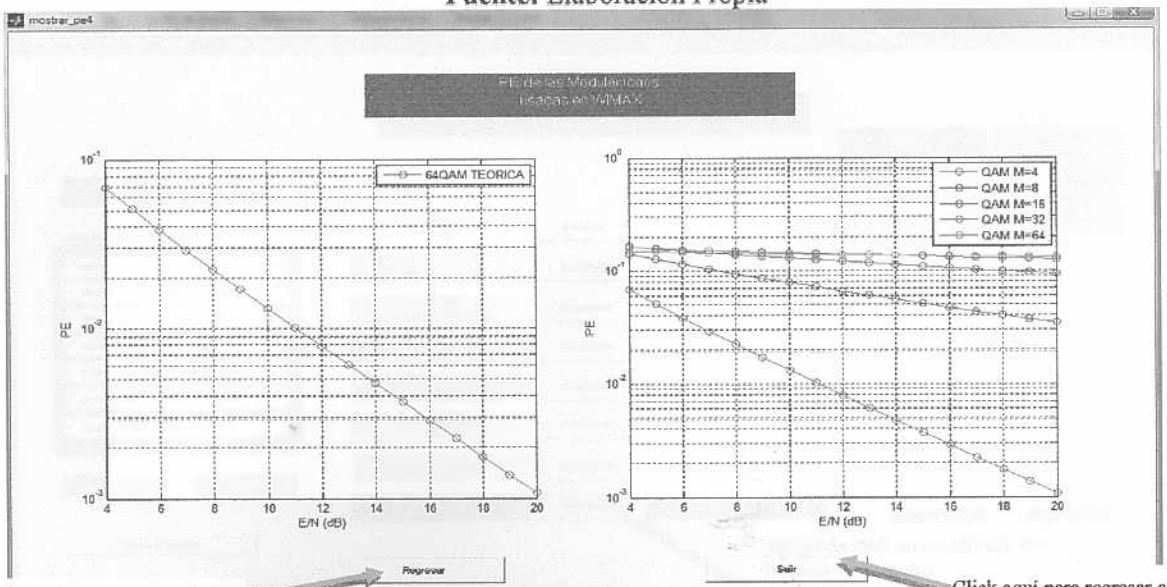


Figura 31. Probabilidad de Error de 32-QAM Teórica
Fuente: Elaboración Propia



Click aquí para regresar a la ventana anterior

Click aquí para regresar a la ventana de resultados

Figura 32. Probabilidad de Error de 64-QAM
Fuente: Elaboración Propia

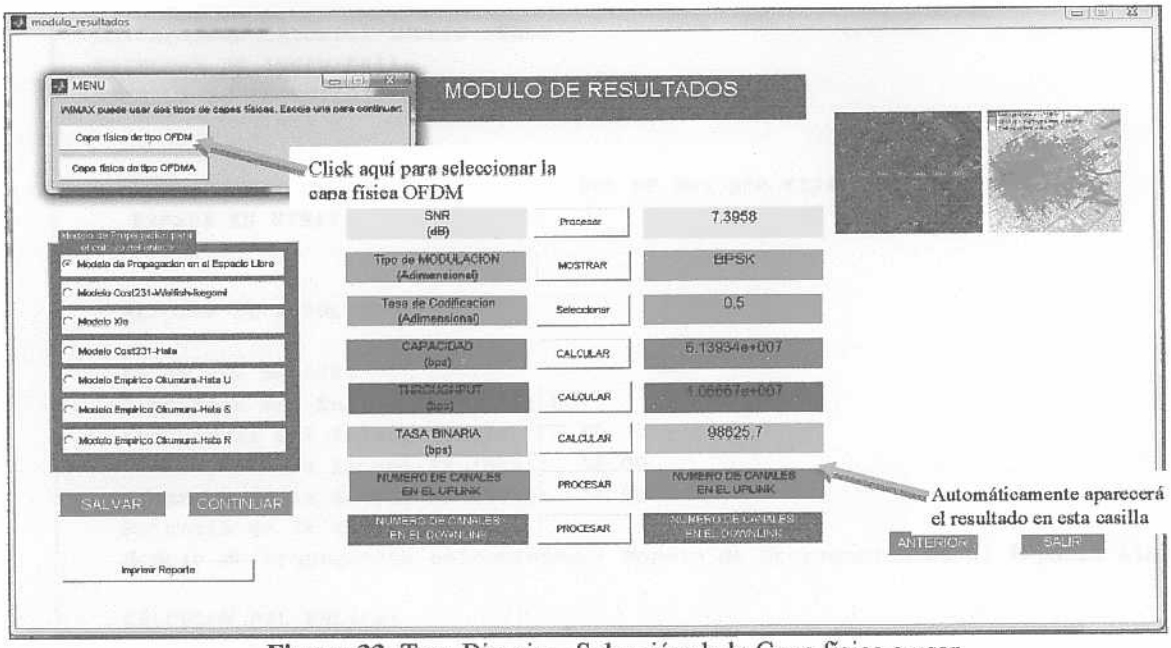


Figura 33. Tasa Binaria – Selección de la Capa física a usar
Fuente: Elaboración Propia

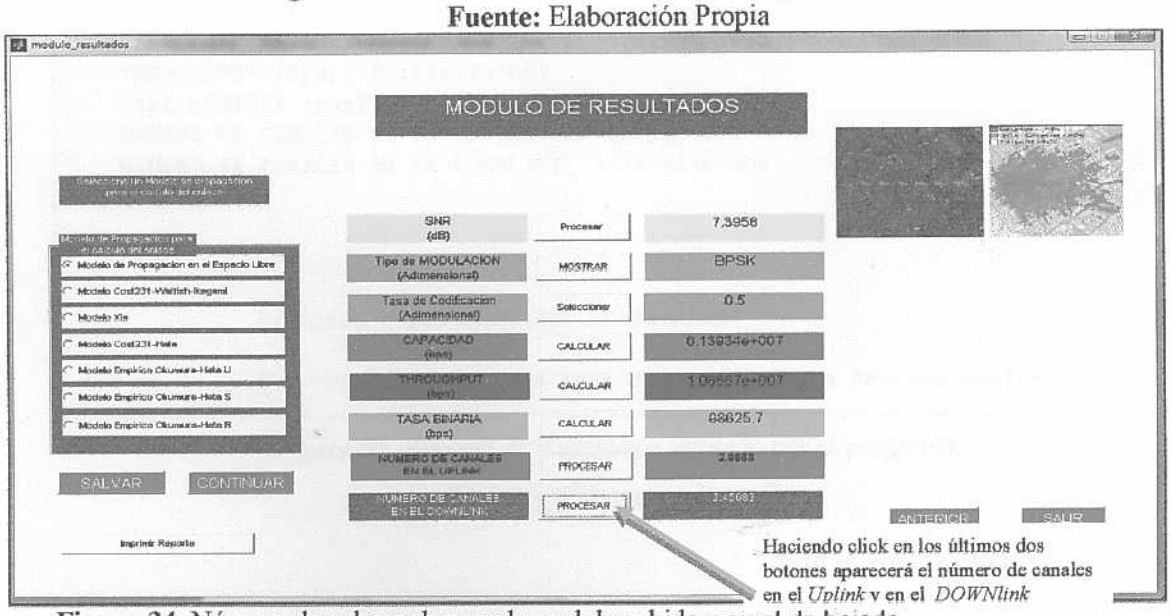


Figura 34. Número de subcanales en el canal de subida y en el de bajada
Fuente: Elaboración Propia

```
UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES

   HERRAMIENTA DE CÁLCULO DE CAPACIDAD DE UNA RED FIJA
   BASADA EN WIMAX

  REPORTE DE RESULTADOS:

  DATOS DEL ENLACE:
  Distancia del Enlace (Km):  12.00
  Frecuencia del Enlace (GHz):   3.50
  Ganancia de la Antena Tx (dBi):  18.00
  Ganancia de la Antena Rx (dBi):  18.00
  Potencia de Tx (mW):   3.00
  Modelo de Propagación seleccionado: Modelo de Propagación en el Espacio Libre

  CÁLCULOS DEL ENLACE:
  Pérdidas Básicas calculadas (dB): 1.249650e+002
  Relación Señal a Ruido (dB): 1.781653e+001
  CAPACIDAD MÁXIMA DEL ENLACE (bps): 4.233928e+007
  THROUGHPUT (bps): 7.111111e+006
  TASA BINARIA (bps): 4.931283e+004
  NUMERO DE CANALES EN EL UPLINK: 5.732608e+000
  NUMERO DE CANALES EN EL DOWNLINK: 4.913664e+000


          Profesor Guía: José Javier Barrios

          Herramienta Elaborada por: Rosell Carolina Barrios Benitez
```

Figura 35. Reporte de Resultados arrojado por el programa

Fuente: Elaboración Propia

Al presionar el botón CONTINUAR el programa iniciará el Módulo de Simulación en donde podrá ver los *demos* que contiene la Herramienta, visualizar las características del terreno, el perfil del enlace y una vista aérea del mismo, así como una foto satelital, proveniente de la herramienta Google Earth, que corresponde al terreno en estudio. Es importante resaltar que la finalidad de éste módulo es mostrar al usuario la simulación de un enlace WIMAX, allí podrá observar el alcance teórico del mismo, así como la cobertura de la antena, entre otras características. A continuación se muestran una serie de figuras que ilustran lo anteriormente expuesto.

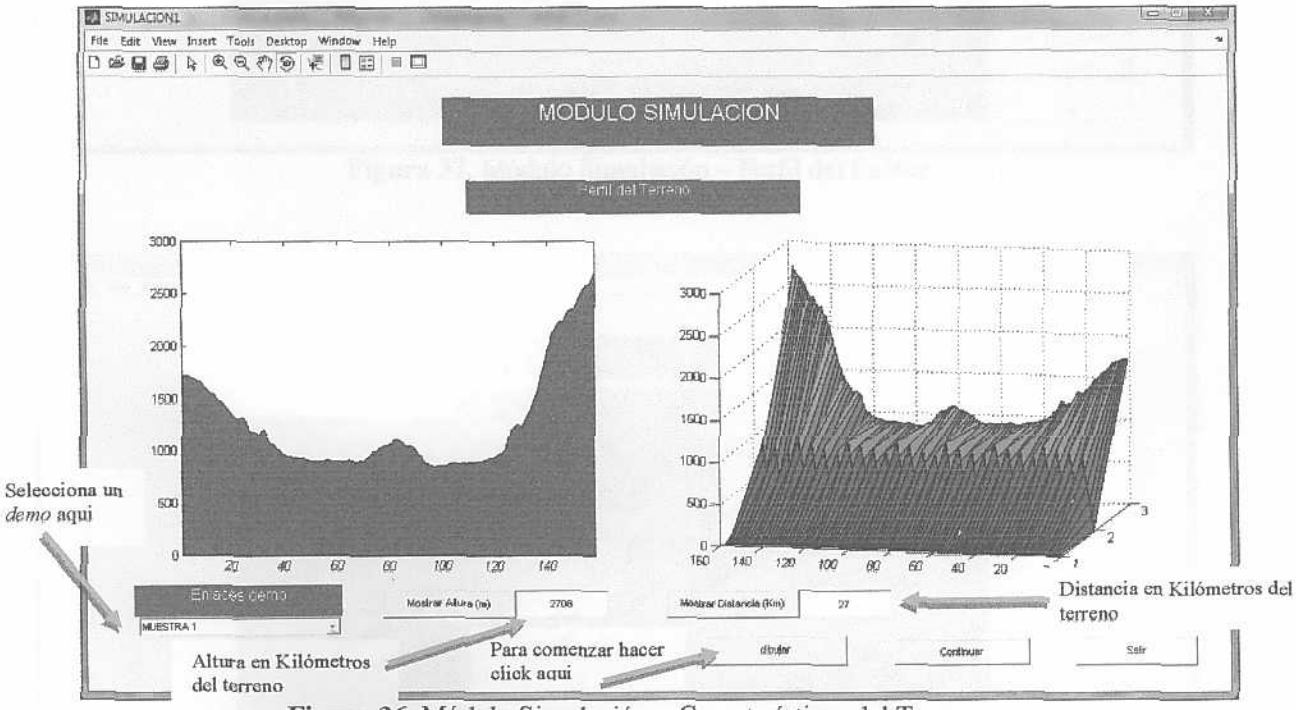


Figura 36. Módulo Simulación – Características del Terreno
Fuente: Elaboración Propia

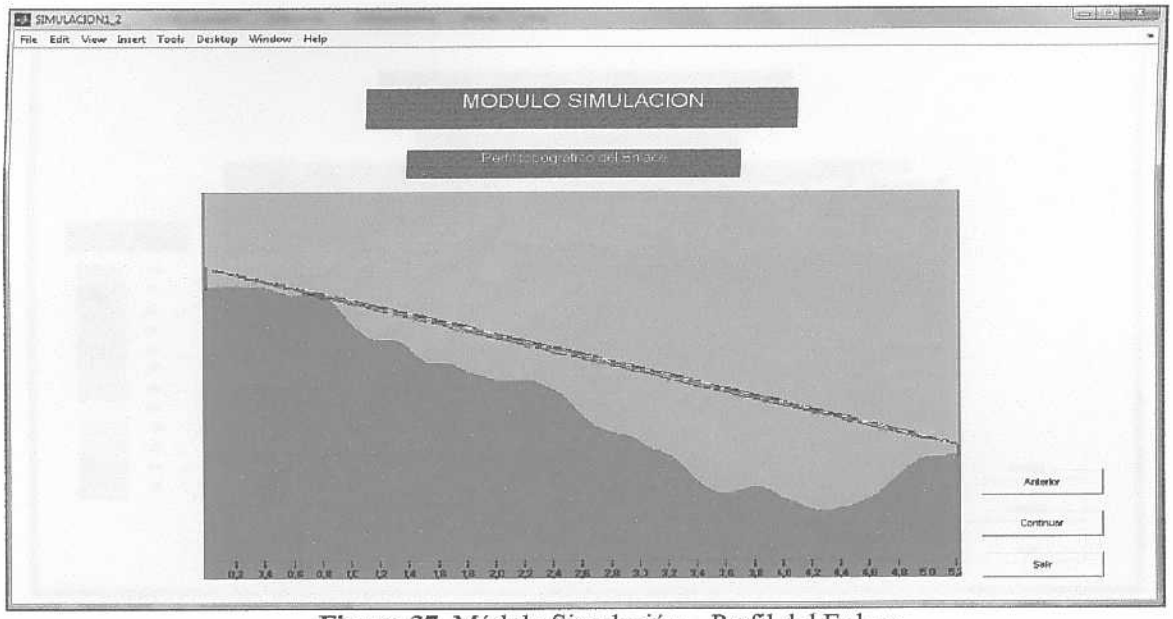


Figura 37. Módulo Simulación – Perfil del Enlace
Fuente: Elaboración Propia

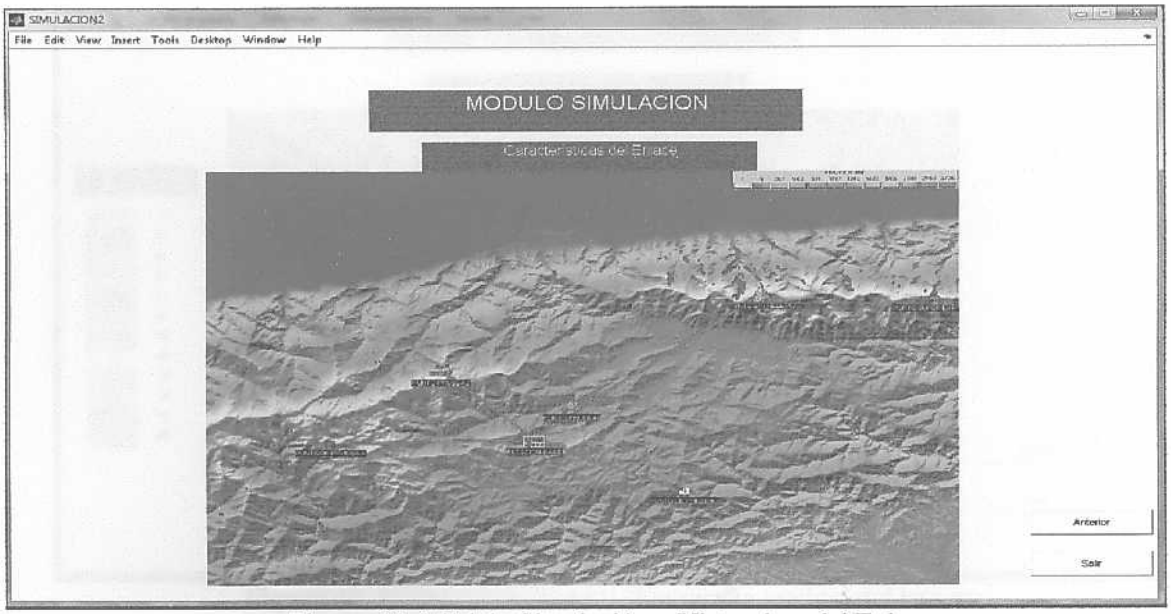


Figura 38. Módulo Simulación – Vista aérea del Enlace
Fuente: Elaboración Propia

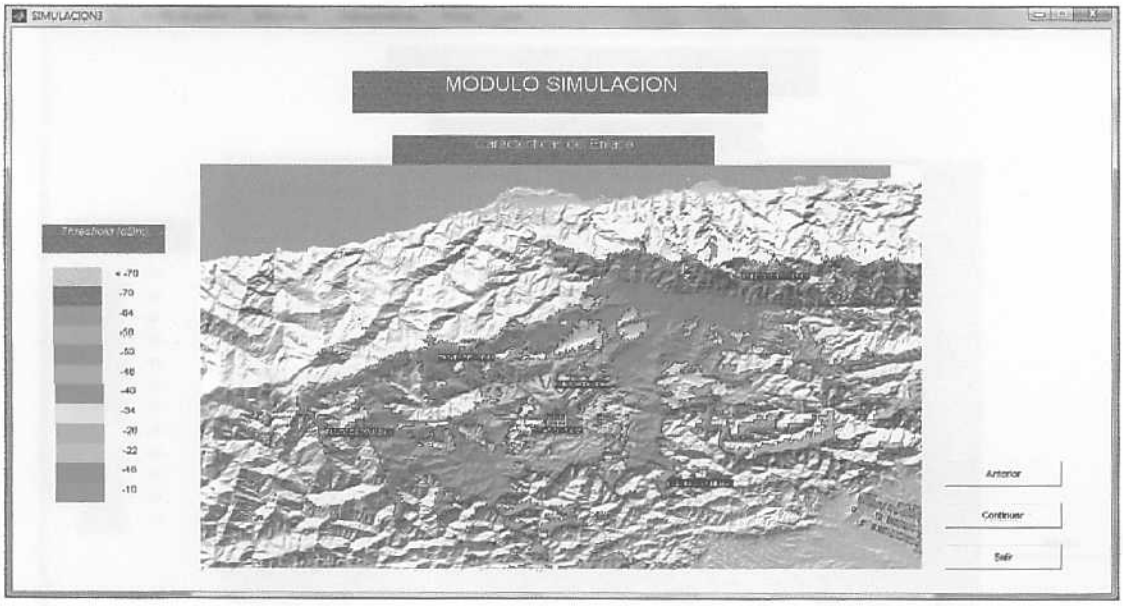


Figura 39. Módulo Simulación – Radio de Propagación y Threshold
Fuente: Elaboración Propia

Figura 40. Módulo Simulación – Fotografía satelital del terreno
Fuente: Elaboración Propia

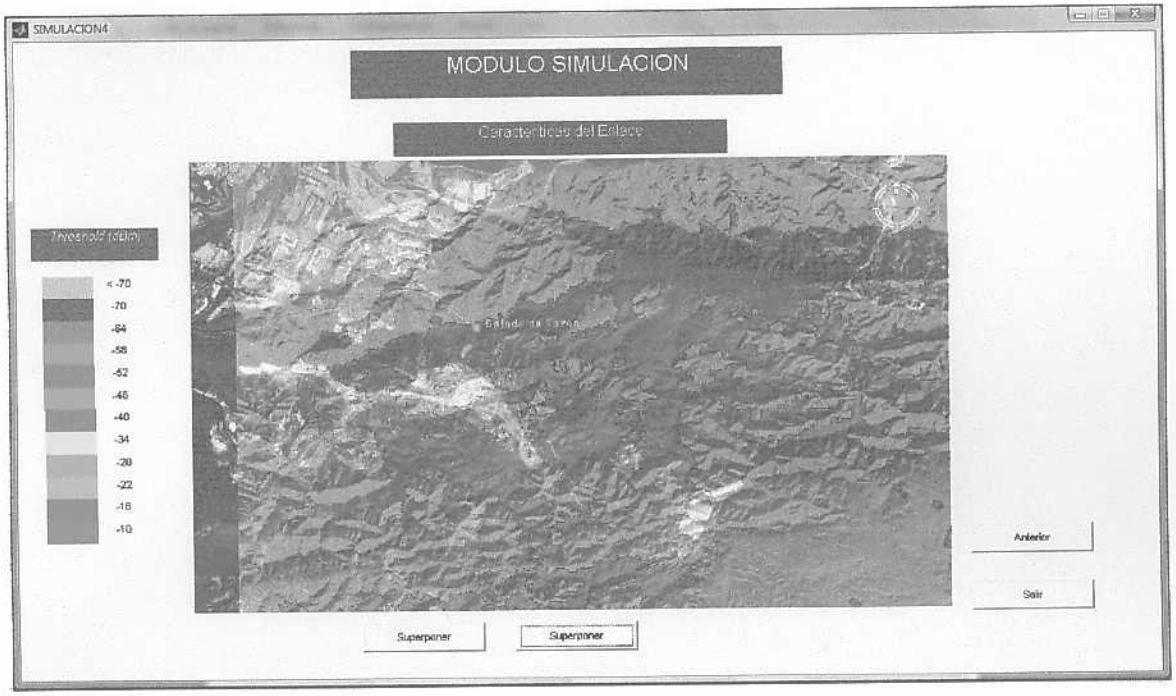


Figura 41. Módulo Simulación – Radio de Cobertura en Fotografía satelital del terreno
Fuente: Elaboración Propia