

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE SEÑAL DE LA RED WIMAX (IEEE
802.16-2004) EN EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE**

DIEGO ALFONSO ALMEIDA GALÁRRAGA

SANGOLQUÍ – ECUADOR

AGOSTO 2010

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado: "ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE SEÑAL DE LA RED *WIMAX* (IEEE 802.16-2004) EN EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE", ha sido desarrollado en su totalidad por el señor DIEGO ALFONSO ALMEIDA GALÁRRAGA con CC: 1720949823, bajo nuestra dirección.

Atentamente

Ing. Román Lara
DIRECTOR

Ing. Darwin Aguilar
CODIRECTOR

RESUMEN

Con el análisis del proyecto se podrá plantear una expresión de propagación de la señal de potencia a través de tecnología *WiMAX*. La investigación completa ayudará a los administradores de la red a predecir el comportamiento del sistema inalámbrico y determinar las mejores zonas para instalar equipos para soluciones de cobertura.

Se estudia la manera en la que las señales microondas se propagan a través del medio, en los diferentes entornos de la universidad. Además se investigan los equipos más apropiados y sus características, para la medición de la señal de potencia y ubicación geográfica en el Campus. Se detalla la metodología que se va a utilizar para identificar el modelo de propagación de potencia, y de esta manera se obtienen las medidas en cada punto.

También se presenta un análisis completo de los resultados obtenidos al realizar las mediciones de potencia y se procede a identificar y validar el modelo con el objetivo de optimizar el estudio de propagación. Luego de realizar un análisis comparativo de la propagación de señal con otras expresiones, se construye un mapa interactivo para que los usuarios en general conozcan la cobertura de la red.

Finalmente el estudio de propagación dio como resultado un modelo preciso que se adapta de mejor manera a redes inalámbricas como la implementada en la Universidad.

DEDICATORIA

Este proyecto que representa uno de los esfuerzos más grandes de mi vida estudiantil, se lo dedico a mis padres, hermanos, familia y amigos que siempre están presentes en mi corazón y en cada una de las cosas que me propongo. Y a la confianza que depositan en mí, para ser una persona grande que quiere cumplir sus metas y objetivos. Siempre estarán en un lugar primordial por ser mi fuente de inspiración y voluntad para seguir adelante.

Diego A. Almeida G.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto tan interesante ha sido realizado gracias en primer lugar a Dios, y a esa grande inspiración que tengo en mi vida. Responsables de mi fuerza para creer y llegar al término de mi carrera.

A mis padres por su apoyo tanto moral como económico y ser ejemplo de superación y entrega. A mis amigos que estuvieron conmigo en los momentos de debilidad y fortaleza.

Un agradecimiento especial y sincero a mis directores de tesis Ing. Román Lara e Ing. Darwin Aguilar por ser mi guía del proyecto y por confiar en mí para el desarrollo del estudio. Con su constante y valiosa orientación fueron muy importantes para el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente proyecto. Así como a todos aquellos profesores y personas involucradas en mi educación en éste período universitario. Gracias a ellos porque me permitieron continuar con la investigación sobre la cobertura WiMAX en el campus universitario.

Diego A. Almeida G.

PROLOGO

El desarrollo de este proyecto permitirá contar con herramientas que ayuden en el planteamiento de nuevas técnicas de transmisión de datos a través de tecnología *WiMAX* así como también analizar el comportamiento respecto de la transmisión con relación a la variación de parámetros como potencia, cobertura, accesos entre otros. Este estudio además ayudará a los administradores de la red a ofrecer un servicio a los usuarios utilizando un medio eficiente y garantizado.

La presente investigación se la va realizar debido a que en nuestro país se han producido hasta el momento muy pocos estudios sobre el análisis de propagación de la señal de sistemas *WiMAX*, lo que ha dificultado aún más su posible implementación, ya que no existen modelos matemáticos propios para sistemas inalámbricos que trabajen en bandas de frecuencias superiores y no licenciadas.

El principal objetivo del proyecto es realizar un análisis comparativo de la propagación de señal de un sistema inalámbrico con tecnología *WiMAX* en el Campus Politécnico de la ESPE, a partir de cierta cantidad de medidas tomadas en la universidad, con estos datos encontrar un modelo matemático de propagación propio del sistema.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO I

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estado del Arte	5
1.3.1. Trabajos Relacionados	5
1.3.2. Proyecto preliminar en la ESPE	8
1.4. Motivación	9

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Características de Propagación	11
2.2. Parámetros importantes de propagación	13
2.2.1. Reflexión y Refracción	14
2.2.2. Difracción	15
2.2.3. Esparcimiento	16
2.2.4. Interferencia	17
2.2.5. Regiones de Campo Cercano y Lejano de una Antena	17
2.2.6. Atenuación	18
2.3. Modelos de propagación	19
2.3.1. Tipos de Modelos	21

2.3.2. Modelo de propagación en Espacio Libre (Free Space).....	22
2.3.3. Modelo de propagación Okumura.....	24
2.3.4. Modelo de propagación de Okumura-Hata	26
2.3.5. Modelo de propagación COST 231 Ohumura-Hata.....	29
2.3.6. Modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami (C231 W-I)	32
2.3.7. Modelo de propagación SUI.....	39
2.4. Análisis del Modelo de propagación por pérdidas de lluvia.....	45

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales para la obtención y análisis de la medida de potencia.....	50
3.2. Dispositivo para obtener la medida de potencia de la Red <i>WiMAX</i>	51
3.2.1. Selección del dispositivo de medición de potencia de la Red <i>WiMAX</i>	51
R&S®ROMES	52
Analizador Universal de Redes de Radio R&S®TSMW.....	54
Analizador de Espectros ANRITSU	56
3.2.2. Analizador de Espectros VNA Master MS2036A.....	59
Manejo y Calibración del Analizador de espectros.....	59
VNA (Vector Network Analizer).....	60
Analizador de Espectros.....	66
3.3. Dispositivo de ubicación geográfica	69
3.3.1. GPS Trimble JUNO SC.....	69
3.3.2. ArcMap	71
3.4. Herramienta de cálculo estadístico (MATLAB).....	73
3.4.1. Requerimientos del sistema para la instalación del programa.....	74
3.4.2. Herramienta Curve Fitting.....	75

3.5. Simulador de cobertura (SIRENET 3.4)	75
3.5.1. Consideraciones del Simulador SIRENET 3.4.0.0.....	76
3.6. Programa geo-espacial (ArcGIS)	78
3.6.1. Consideraciones del programa ArcGIS	78
3.7. Metodología para la medición de la señal de potencia	79
3.7.1. Ubicación Actual de la Red.....	80
3.7.2. Reconocimiento de los puntos de análisis en el Campus de la ESPE	82
3.7.3. Técnicas para obtener la medida de la señal en cada punto	87

CAPÍTULO IV

ESCENARIOS DE PRUEBAS Y PRESENTACIÓN DE MEDICIONES

4.1. Características de los escenarios de prueba	91
4.2. Recolección de información.....	93
4.2.1. Cantidad de muestras para un menor margen error.....	93
4.3. Presentación y tabulación de los resultados	96
4.3.1. Tabulación de las medidas de potencia	96
4.3.2. Tabulación de los puntos para el error mínimo	100

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE DATOS Y OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE PROPAGACIÓN

5.1. Análisis de los resultados obtenidos	104
5.2. Cálculo de la Pérdidas de Potencia	108

5.3. Creación de un Modelo matemático de propagación con los datos obtenidos	112
5.3.1. Procedimiento para la obtención del modelo	112
Modelo de propagación de pérdidas de la señal.....	113
Modelo de Propagación de la Potencia de Recepción	124
5.3.2. Procedimiento para la obtención del área de cobertura de potencia de la señal <i>WiMAX</i>	128
Modelo matemático en función de la potencia	129
Área de la cobertura de Potencia en MATLAB	130
5.4. Análisis de propagación del Modelo ESPE_ <i>WiMAX</i> con otras expresiones.....	136
5.5. Simulación de propagación con el programa SIRENET.....	145
5.5.1. Simulación en SIRENET con el nuevo modelo matemático de propagación	146
5.5.2. Simulación en SIRENET con los diferentes modelos matemáticos de propagación para el estudio de la red <i>WiMAX</i>	154
5.6. Elaboración de un mapa de la ESPE con la utilización de la herramienta ArcGIS	157
5.6.1. Diseño del mapa interactivo de propagación.....	158
Mapa de Cobertura con las medidas reales	159
Mapa de Cobertura con el modelo ESPE_MODEL.....	161
Mapa de fotografías de las 185 señales de propagación de potencia	163
5.6.2. Análisis de los mapas de cobertura y del mapa de la información de las fotografías	166
5.7. Validez del modelo matemático de propagación	167

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones	169
6.2. Recomendaciones.....	171

ANEXOS

ANEXO 1: TABLA COMPLETA DE INFORMACIÓN DE POTENCIA DE LA SEÑAL .	177
ANEXO 2: INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS PARA LA RED WIMAX Y SIMULACIÓN CON EL MODELO SUI EN SIRENET.....	186
ANEXO 3: PROCEDIMIENTO QUE SE SIGUE PARA IDENTIFICAR LOS MAPAS DE INFORMACIÓN DE COBERTURA CON LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA ARCGIS	196
ANEXO 4: GRÁFICAS MÁS IMPORTANTES DE PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL WIMAX.....	208

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores <i>Cm</i> para el factor de corrección para tomar en cuenta el ambiente de propagación.....	30
Tabla. 2.2 Parámetros numéricos del modelo de propagación SUI.....	41
Tabla 2.3 Factores de corrección que intervienen en la red	42
Tabla 3.1 Tipos de antenas con sus respectivas características	64
Tabla. 3.2. Distancia con respecto a la Radio Base, alturas y coordenadas de las dependencias de la ESPE.....	82
Tabla 4.1. Puntos con las tres medidas para cada localidad y el valor correspondiente para cada expresión.....	95
Tabla 4.2. Puntos más sobresalientes de todo el Campus con su respectiva información	98
Tabla 4.3 Medidas, valor de la media aritmética y porcentaje de dispersión de 20 puntos....	102
Tabla 5.1. Número de puntos en un Rango de potencia determinado	106
Tabla 5.2. Dispersión en función de la cantidad de puntos	107
Tabla 5.3. Información de pérdida de potencia de propagación de la señal <i>WiMAX</i>	111
Tabla 5.4. Parámetros que intervienen en la transmisión y recepción de la señal.....	125
Tabla 5.5. Colores del área de cobertura respecto a los Rangos de Potencia y Distancia.....	132
Tabla 5.6. Modelos matemáticos de propagación	138
Tabla 5.7. Promedio de error de cada Modelo respecto a las medidas reales de potencia.....	144
Tabla 5.8. Características de las parámetros de Tx y Rx de la simulación	150
Tabla 5.9. Información de la Potencia Rx y del Modelo ESPE_MODEL para el programa ArcGIS	159

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Zona de Fresnel con LOS.....	12
Figura 2.2. Enlace NLOS	12
Figura 2.3. Ángulos de reflexión θ_1 y refracción θ_2	15
Figura 2.4. Fenómeno de difracción.....	16
Figura 2.5. Principio de Esparcimiento	16
Figura 2.6. Curvas de atenuación relativa de Okumura	25
Figura 2.7. Parámetros que intervienen en el modelo C231.....	33
Figura 2.8. Ángulo de incidencia entre la onda, desde la estación base y el equipo receptor...35	
Figura 2.9. Atenuación específica para distintas intensidades de lluvia	47
Figura 3.1. Software de medición R&S®ROMES.....	54
Figura 3.2. R&S®TSMW.....	55
Figura 3.3. se puede observar el Equipo VNA Anritsu Master.....	57
Figura 3.4. Conectores para las diferentes funciones del dispositivo.....	58
Figura 3.5. Límite inferior (start f) y el límite superior (stop f)	60
Figura 3.6. Acoplador para realizar la medición	61
Figura 3.7. Carta de Smith y el VSWR de la antena del dispositivo de medición	63
Figura 3.8 Carta de Smith y el VSWR de la antena del dispositivo de medición	65
Figura 3.9. GPS Trimble Juno SC	70
Figura 3.10. Programa ArcMap.....	72
Figura 3.11. Ubicación de la estación base y las suscriptoras	81
Figura 3.12. Base de Datos de los puntos analizados.....	83

Figura 3.13. Mapa de la ESPE con los 153 puntos a ser analizados y su simbología.....	84
Figura 3.14. Mapa de la ESPE con todos los nuevos puntos y su simbología	86
Figura 3.15. Manera como se debe tomar la medida de la señal <i>WiMAX</i> en el Campus Politécnico.....	89
Figura 4.1. Zonas donde se realiza las medidas de propagación de la señal	91
Figura 5.1. Potencia de Recepción	110
Figura 5.2. Guardar Workspace como ESPE_MODEL	114
Figura 5.3. Matrices X y Y en Workspace con los valores de distancia y pérdidas.....	115
Figura 5.4. Abriendo herramienta Curve Fitting	115
Figura 5.5. Creación de puntos Potencia (dB) vs. Distancia (m) con la herramienta Curve Fitting	116
Figura 5.6.Exclusion de puntos para realizar el ajuste del modelo con la herramienta Curve Fitting	117
Figura 5.7. Puntos excluidos e incluidos para realizar el ajuste del modelo	118
Figura 5.8. Ingreso de la nueva ecuación	119
Figura 5.9. Ingreso de la ecuación logarítmica en Fit Editor	120
Figura 5.10. Puntos de potencia en función de la distancia y modelo de pérdidas de propagación ESPE_MODEL con la herramienta <i>Curve Fitting</i>	121
Figura 5.11. Modelo ESPE_MODEL.....	124
Figura 5.12. Modelo de propagación potencia de recepción PRX_MODEL.....	128
Figura 5.13. Modelo Distancia en función de la Potencia de Recepción D_MODEL	133
Figura 5.14. Cilindro que forma la curva del modelo y edición de la barra de colores	134
Figura 5.15. Área de cobertura	135

Figura 5.16. Análisis comparativo con la herramienta Curve Fitting	140
Figura 5.17. Análisis comparativo del modelo ESPE_MODEL con el resto de modelos	142
Figura 5.18. Análisis comparativo del modelo RX_MODEL con el resto de modelos	143
Figura 5.19. Edición de un nuevo elemento para formar la expresión del modelo matemático	148
Figura 5.20. Fórmula para el cálculo de la atenuación.....	149
Figura 5.21. Análisis de Cobertura de la Señal WiMAX con el nuevo modelo matemático..	151
Figura 5.22. Área de cobertura con la herramienta SIRENET en Google Earth.....	152
Figura 5.23. Perímetro de la ESPE con cada zona de cobertura	153
Figura 5.24. Análisis del área de cobertura de los modelos matemáticos para la Red WiMAX con la herramienta SIRENET.....	155
Figura 5.25. Análisis del área de cobertura de los modelos matemáticos con la herramienta Google Earth	156
Figura 5.26. Mapa de Cobertura con las medidas reales	160
Figura 5.27. Mapa de Cobertura con el modelo ESPE_MODEL.....	162
Figura 5.28. Descripción de la de la información disponible en el mapa elaborado.....	164
Figura 5.29. Mapa de fotografías de la antena y los 184 puntos seleccionados para el análisis de cobertura.....	165

CAPÍTULO I

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1. Introducción

Los sistemas inalámbricos han ido reemplazando a las comunicaciones a través de cables, las nuevas redes no utilizan medios de propagación físicos y se las maneja a través de la modulación de ondas electromagnéticas. Éstas se propagan por el espacio sin ningún tipo de conexión física que comunique a cada uno de los extremos de la transmisión. Tienen ventajas como la rápida instalación de la red, sin la necesidad de usar cableado y permiten la movilidad de la misma. Brinda servicios de banda ancha en zonas, donde el despliegue de cable o fibra por la baja densidad de población presenta costos por usuario muy elevados. [1]

WiMAX, significa Interoperabilidad Mundial para el Acceso por Microondas, es la marca que certifica que un producto está conforme con los estándares de acceso inalámbrico IEEE 802.16. Este estándar permite el acceso de banda ancha sin cables en última milla. Es una tecnología que admite la recepción de datos por microondas y retransmisión por ondas de radio.

La tecnología *WiMAX* ha sido instalada en todo el Campus de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) por tal razón la red inalámbrica de la Universidad posee grandes ventajas frente a otro tipo de estándares debido a que presenta una alta capacidad para un considerable número de usuarios. Adicionalmente tiene un gran ancho de banda y es adecuada para tráfico continuo a manera de ráfagas. Razón por lo cual es independiente de protocolo, logrando

transportar IP, Ethernet, ATM, entre otras. De esta forma soporta servicios múltiples, resultando idónea para la transmisión de voz sobre IP (VoIP), datos y vídeo. [2]

Es necesario realizar la medición de potencia de propagación de la señal transmitida por la radio base y mediante el análisis de los datos obtenidos en campo, hallar un modelo matemático de propagación, contribuyendo con esto al mejoramiento de transmisión de datos en el Campus de la ESPE. Para efectuar las mediciones se utilizó un analizador de espectros que permite visualizar en pantalla los componentes de potencia, además fueron utilizados equipos de ubicación y herramientas de cálculo descritos en el capítulo III.

Las zonas de estudio están caracterizadas por el alto flujo estudiantil, administrativo, comercial, todos estos con acceso a la red *WiMAX*, por esta razón hay que analizar la calidad de la señal mediante los equipos adquiridos. Las mismas, corresponden a los edificios y construcciones de cada uno de los departamentos, así como a los sectores de logística, recreación y campos abiertos a los que se desea brindar todos los servicios aplicables a la red diseñada.

Desde el punto de vista del diseño de una red inalámbrica, especialmente en lo concerniente a la cobertura que se desea lograr en el sistema, es importante tener un modelo de predicción de pérdidas de propagación de ondas. Estos modelos permiten con cierta exactitud determinar cuál va a ser la pérdida de potencia que afectará a una señal al propagarse en un ambiente como el del Campus Universitario. Este valor de pérdida es importante para determinar el rango de cobertura de la radio base. Mientras más exacto sea el modelo de predicción con mayor exactitud se podrá determinar el valor de potencia que deberá cubrir una región de interés.

Para el desarrollo del actual proyecto es importante la descripción del: "Diseño y simulación de una red con tecnología *WiMAX* (IEEE 802.16-2004) para el Campus Politécnico de la ESPE", y con esta información generar comparaciones con las simulaciones realizadas en el estudio y los datos de las mediciones reales de propagación de señal.

Con el modelo matemático propuesto que resulte de realizar el presente trabajo y el análisis de propagación de señal de la red *WiMAX*, se entregará un aporte a la comunidad científica tecnológica y la ESPE estará en la capacidad de monitorear el comportamiento de la red que actualmente se encuentra implementada en el Campus.

El desarrollo de este proyecto permitirá contar con herramientas de monitoreo de cobertura como el modelo propuesto, el mismo que será representado mediante información (mapas, tablas, puntos georeferenciados de toma de lecturas de potencia obtenidos en campo) que ayuden a predeterminar el nivel de acceso de transmisión de la estación en un punto específico a través de tecnología *WiMAX*. De esta manera se podrá analizar el comportamiento del sistema con relación a la variación de parámetros como potencia, cobertura, distancia, frecuencia entre otros. Esta investigación además ayudará a los administradores de la red a ofrecer un servicio a los usuarios utilizando un medio eficiente y garantizado.

Finalmente es indispensable validar el modelo matemático, por tal motivo se realizan simulaciones con herramientas para obtener resultados positivos de cobertura. Además se compara la expresión de propagación con otros modelos para tecnología *WiMAX* y de esta manera generar un análisis completo del estudio.

1.2. Objetivos

El objetivo general del actual proyecto es realizar un análisis de propagación de la red *WiMAX* en el Campus Politécnico de la ESPE y finalmente generar un modelo matemático de la señal de potencia.

Para dar inicio al proyecto de investigación es indispensable identificar los objetivos específicos que se presentan a continuación:

Recopilar información de los trabajos relacionados con el desarrollo de modelos matemáticos de propagación, para establecer parámetros relevantes que permitirán proponer una expresión inalámbrica óptima propia de esta tecnología.

Identificar los equipos necesarios para medir la señal de la red *WiMAX* correctamente en las diferentes dependencias y entornos de la ESPE.

Determinar los parámetros necesarios de los dispositivos de medición y en general de todos los equipos que forman parte del sistema inalámbrico para obtener una excelente medida de potencia.

Investigar el proceso de recolección de información y determinar el número de medidas de potencia por cada punto, para conseguir de esta forma un error mínimo del valor de potencia que se recepta en el equipo. De esta manera se puede iniciar el análisis de la propagación de la señal de la red.

Analizar los datos de potencia obtenidos con los dispositivos de medición, y con los datos que arroje el estudio crear y validar un modelo matemático de propagación el cual se va a adaptar a situaciones propias de la Escuela Politécnica.

Comparar los resultados del modelo matemático con el resto de expresiones de propagación de la señal *WiMAX* con el objetivo de optimizar el estudio de propagación y perfeccionar los procesos relacionados con el diseño de estas redes. Además identificar las diferencias en el simulador realizadas con todos los modelos propios para sistemas inalámbricos.

Elaborar un mapa interactivo digital que muestre los resultados del análisis y a través de esta información obtener información completa de cobertura.

1.3. Estado del Arte

Para alcanzar los objetivos planteados es ineludible una buena planificación del despliegue del sistema tomando en cuenta que, es necesario un conocimiento y comprensión profunda de temas de propagación, atenuación y de distintos modelos propuestos por autores que se ajustan al sistema *WiMAX*.

En el presente proyecto se va a estudiar la propagación de potencia de la red *WiMAX* en el Campus Politécnico, y cabe indicar que muchos de los trabajos publicados al respecto exponen que la atenuación y pérdidas de la señal se produce, principalmente, a la distancia con respecto a la radio base, atenuación por lluvia y por pérdidas que se producen en el medio donde se propaga la señal.

En esta sección se mostraran los trabajos previos relacionados a la propagación de potencia. En el estudio se menciona los modelos para diferentes redes inalámbricas y la manera de encontrar dichas expresiones. Las publicaciones tratan de establecer los parámetros necesarios que permitan identificar el mecanismo específico para cada sistema.

1.3.1. Trabajos Relacionados

Los modelos a menudo se basan en expresiones probabilísticas con las cuales se puede calcular la potencia con cierta posibilidad de que la señal llegue o no a un punto específico. La mayoría de los modelos se basan en mediciones realizadas en el lugar de interés. Se toma una cantidad necesaria de medidas las cuales se promedian para establecer las ecuaciones de propagación en estos medios, el cual es útil para cada entorno. Algunos de estos modelos pueden servir de base para otras expresiones, es por esto que no se puede separar las teorías matemáticas de la información estadística que se puede adquirir del ambiente en estudio. [3]

El modelo de Okumura basó sus estudios en mediciones experimentales realizadas en Japón. Okumura desarrolló un set de curvas que entregan la atenuación relativa al espacio libre para una zona urbana, en base a parámetros predefinidos y extensas mediciones. Los valores de cada curva fueron obtenidos usando antenas verticales y omni-direccionales y con la aplicación final de cartas gráficas. [4]

El modelo de Okumura-Hata, es tal vez uno de los más difundidos, el cual se basa en una serie de medidas realizadas en el área urbana de Tokio que fueron llevadas a tablas por Okumura; posteriormente, Hata llevó estas tablas a un algoritmo matemático fácilmente implementable a través de un software y un computador. Las aproximaciones hechas por Hata involucran dividir las áreas de predicción categorizadas por el tipo de terreno, llamadas área abierta, urbana y suburbana. En este modelo se obtiene una fórmula empírica para las pérdidas por propagación. [5]

El modelo COST 231 Walfisch- Ikegami es la combinación de los modelos Walfisch-Bertoni y el modelo Ikegami con unas correcciones empíricas de algunos parámetros. El modelo considera el impacto de los techos de los edificios en la propagación de la señal, utilizando fórmulas para determinar factores empíricos de corrección que intervienen para predecir el nivel de señal a la altura de la calle. Este modelo está basado en una serie de mediciones hechas para frecuencias menores a 3,5 Ghz, por lo tanto la expresión es estadística, ya que sólo puede considerar valores característicos del entorno. Su precisión depende no sólo de la exactitud de las medidas, si no de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analizar. [6]

El modelo de ERCEG está basado en una extensiva recolección de datos experimentales realizadas en 95 macro celdas de todo EEUU, para frecuencias del orden de 1900 MHz. Las mediciones fueron tomadas mayormente en las áreas sub-urbanas de New Jersey, Seattle, Chicago, Atlanta y Dallas. Luego de introducir todas las medidas adquiridas en un software el resultado fue el modelo de ERCEG el cual es aplicable mayormente para desarrollos

inalámbricos sin línea de vista (N-LOS). Este modelo fue adoptado por el grupo de la IEEE 802.16 como el modelo recomendado para aplicaciones *WiMAX* fijas. [7]

El modelo Allsebook caracteriza a las ciudades británicas teniendo una base de 75 datos medidos en el rango de 450 MHz, este mismo modelo hace dos consideraciones, se tomo medidas en una ciudad plana y el otro bajo ciertas correcciones, se obtiene un nuevo modelo con medidas tomadas en una ciudad con mayor número de obstáculos. [8]

La Universidad de Stanford desarrolló un conjunto de modelos de canal para la simulación del fenómeno de multitrayectoria en sistemas inalámbricos. Estos modelos se denominan *Stanford University Interim Models* (SUI). Con el uso de estos modelos de canal es posible entonces predecir más exactamente la cobertura que se puede alcanzar con una estación base configurada de una manera determinada para redes *WiMAX*. Se ha realizado una gran cantidad de mediciones en varias áreas de Estados Unidos para obtener finalmente la expresión matemática. [9]

Walden-Rowsell es un modelo empírico simple, basado en mediciones realizadas directamente en la banda de 3,5GHz. Actualmente se está utilizando este modelo en otro proyecto en el interior del GIDATI que es el Grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicación en Telecomunicaciones e Informática en Medellín - Colombia para la creación de un modelo genérico de la capa física de sistemas *WiMAX*. Al modelo se lo aplicó sobre el programa Network Simulator 2, para identificar una nueva expresión bajo características propias del medio, de tal manera se obtiene una mejor aproximación a los datos reales que se analizó en esta ciudad. [10]

3D Intelligent Ray Tracing es una expresión desarrollada principalmente en *Stuttgart University*. Es un modelo geométrico algo complejo, pero considerando que se cuenta con información cartográfica detallada, su implementación deberá ofrecer buenos resultados. Para determinar la expresión matemática se incluyen análisis geométricos a través de características físicas, estadísticas, y el análisis espaciotemporal que actualmente se encuentra en pleno

desarrollo con el objetivo de impulsar nuevas tecnologías de comunicaciones. Es determinístico ya que utiliza un modelo físico de la zona donde se quiere calcular el nivel de señal recibido y trata de modelar la interacción de las ondas propagadas con cada objeto. [10]

Para identificar el modelo de Propagación de Ondas Electromagnéticas para la Ciudad de Santo Domingo en República Dominicana a una Frecuencia de 1.9 GHz, como primer paso se tomaron mediciones en el campo. Luego se desarrolló una formulación en base a regresión logarítmica para describir la pérdida en esta zona. En total se tomaron alrededor de 300 mediciones a diferentes distancias del transmisor. Finalmente se ajustó el modelo para reducir el error con respecto a las mediciones de campo. [11]

1.3.2. Proyecto preliminar en la ESPE

Luego de un estudio e identificación de varios modelos matemáticos de propagación de la señal *WiMAX* es necesario mencionar brevemente al proyecto "Diseño y simulación de una red con tecnología *WiMAX* (IEEE 802.16-2004) para el Campus Politécnico de la ESPE". Con este artículo se dio inicio al análisis de una nueva tecnología en la Universidad.

En la investigación preliminar se determinaron los parámetros necesarios y las características topográficas del entorno para el diseño de una red de comunicación inalámbrica, utilizando tecnología *WiMAX*. Este procedimiento se efectuó mediante un análisis de los requerimientos para una cobertura óptima. Además se estableció los parámetros de diseño, a través de cálculos matemáticos los cuales permitan un recomendable rendimiento del sistema de comunicaciones *WiMAX*. Una vez diseñada la red, se realizó la simulación de zonas de cobertura y el desempeño de la red diseñada.

En el estudio que antecede se realizó un análisis de los resultados obtenidos en los simuladores para determinar los factores que intervienen en la propagación de la señal, así como el área de cobertura y la capacidad de la red en distintos escenarios. Además se realizó

un análisis para determinar los equipos que forman parte de la red, los cuales serían los mejores para la implementación tanto en rendimiento como en costos.

Para el proyecto actual se utiliza como base elemental el estudio antes mencionado. Efectuando un análisis de la nueva ubicación de la estación base y suscriptoras. Es necesario generar comparaciones con las simulaciones realizadas y los datos de las mediciones reales de propagación de señal los cuales se obtendrán en el presente proyecto.

Se realizaron ciertos cambios en la ubicación de los equipos, esto se produjo por razón de permisos. Se llega a la identificación que tanto los equipos seleccionados como la nueva ubicación estratégica de cada uno de los componentes del sistema arrojaron un resultado óptimo en los niveles de la intensidad de potencia de la señal como antecedente previo importante para dar inicio al desarrollo del actual proyecto. Con la nueva ubicación se pudo observar en las primeras simulaciones en SIRENET un resultado favorable para que el sistema funcione de manera eficiente, la simulación se puede identificar en el Anexo 2. Se realizó estas demostraciones con un modelo de propagación estándar para *WiMAX* mejor llamado SUI, la Universidad se encuentra dentro de un nivel óptimo de cobertura, con una intensidad superior de potencia necesaria para apoyar las comunicaciones de voz y banda ancha inalámbrica orientada a los datos y video. Con los niveles de potencia que nos entrega la red se obtiene una operación óptima en el proceso de transmisión de información (voz, datos y video), se da estos resultados ya que la red incrementa notablemente su rendimiento en condiciones y entornos de propagación como las que se presenta en este diseño.

1.4. Motivación

Con la creación de un nuevo modelo matemático para la Universidad, se obtiene información suficiente y necesaria para empezar a determinar qué factores son los que mayormente impactan en la propagación de potencia. De esta manera se presenta un aporte a la investigación en la Universidad, dotando de una herramienta, diseñada para asistir en las labores de ingeniería de red y apoyar en las decisiones referentes a tecnología *WiMAX*.

El modelo matemático que resulte de la presente investigación será utilizado en los diferentes ambientes de la Universidad y en otros que sean semejantes al de la Escuela Politécnica, de esta manera se encuentra una ecuación propia de la tecnología *WiMAX*, la cual permite identificar con cierta probabilidad los datos obtenidos con dispositivos de medición en dichos ambientes. Resulta más fácil predecir resultados con la formulación que se encontrará en el presente artículo para futuros proyectos.

Se aportará a la Universidad con un mapa interactivo donde se mostrará la huella de cobertura real, y se publicará las zonas con mayor y menor intensidad de la señal. La información digitalizada del mapa se podría presentar en la página web de la Universidad para que los estudiantes, profesores, administrativos y usuarios en general conozcan la cobertura de la red y de esta manera predeterminen el nivel de acceso que dispondrán de la misma dependiendo el sitio en el cual se encuentren dentro del Campus.

Este documento es importante ya que enfoca el estudio completo de propagación, con el modelo de canal se pretende entender varios fenómenos que intervienen al propagarse una onda por un determinado medio de transmisión.

El actual proyecto es un aporte a la tecnología ya que dentro del estudio se analiza los diferentes entornos que el Campus tiene, este tipo de análisis no son comúnmente desarrollados debido al incipiente despliegue de la tecnología *WiMAX*, no hay disponibles todos los estudios y pruebas de campo que serían deseables. La validación de resultados teóricos, y el uso de la aplicación de medidas en entornos similares a la Universidad, causa profundo interés en el estudio de diferentes entornos y que son parte del Campus.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Características de Propagación

En este capítulo se analiza la forma en la que las señales microondas se propagan a través del medio, para el caso de la ESPE el Campus consta de diferentes ambientes en los cuales la propagación de microondas y la dispersión por los bosques, calles, edificios, campo y canchas son importantes fenómenos, que consta además de una nueva tecnología, en este caso de *WiMAX* que contiene una amplia característica inalámbrica.

La tecnología *WiMAX* para el Campus Politécnico permite el funcionamiento de enlaces en condiciones de línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS), siendo el resultado, una mejor cobertura, clientes más accesibles, con mayores posibilidades de negocio para la red.

En los enlaces LOS, la señal viaja por un camino directo que no posee obstrucciones entre el transmisor y el receptor; en este tipo de enlace se requiere que la mayor parte de la primera zona de *Fresnel* esté libre de cualquier obstrucción, como se puede ver en la figura 2.1 al no tomarse en cuenta dicha consideración se produce una reducción en relación al nivel de intensidad de la señal recibida. [12]

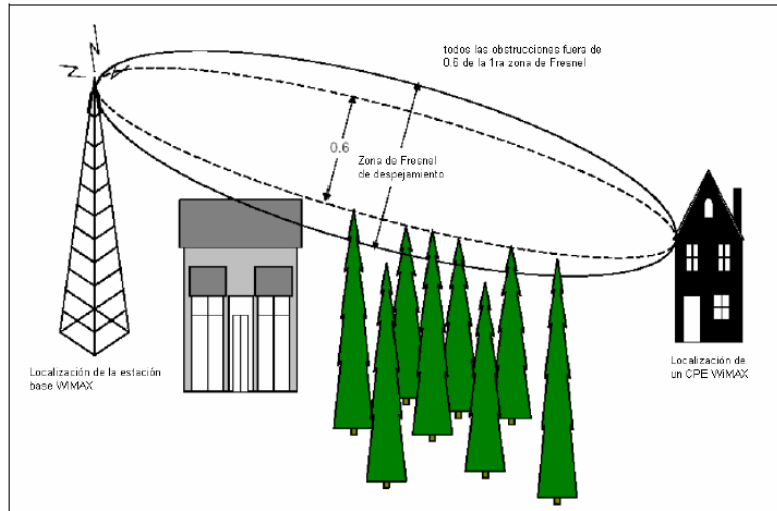


Figura 2.1. Zona de Fresnel con LOS

En un enlace NLOS, una señal alcanza el receptor a través de reflexiones, difracciones y dispersiones. La señal que llega al receptor está formada por una composición de señales que llegan a través de las anteriores formas de propagación (reflexiones, dispersiones y difracciones). Estas señales tienen diferentes retardos, atenuaciones, polarizaciones y estabilidad relativa frente a la señal que se transmite por el camino directo. El fenómeno de desvanecimiento multi-camino puede causar también que la polarización de la señal cambie. Así el rehúso de frecuencias, que normalmente se hace en los despliegues LOS, puede ser problemático en el caso de los NLOS. En la Figura 2.2 se observa este fenómeno.

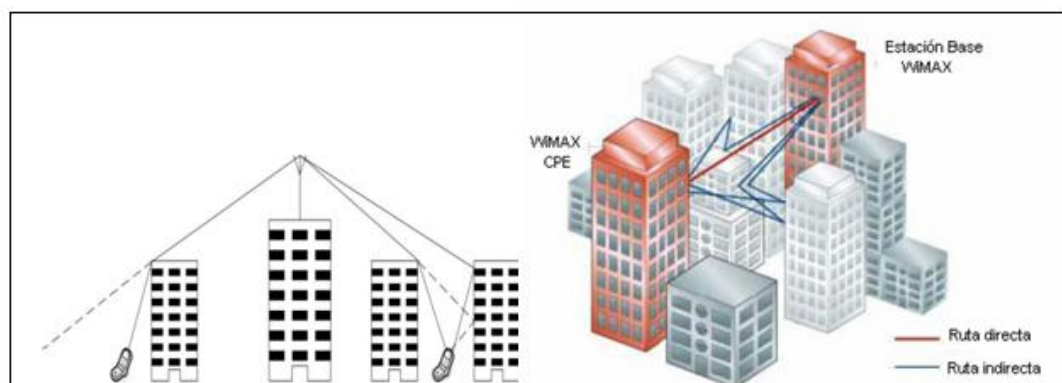


Figura 2.2. Enlace NLOS

Para el caso del presente análisis el camino por el cual va la señal a partir de la estación base a la estación subscriptora puede atravesar de forma sencilla como el caso de LOS en el cual no se presenta obstáculos hasta un entorno en el cual se presenten obstáculos tales como edificios, bosques y otros elementos que pudieran interferir en la transmisión.

Un parámetro importante es la frecuencia la cual produce un cambio en la propagación de la señal por lo tanto es una característica de la banda de la comunicación inalámbrica que debemos tomar en cuenta para el análisis de propagación de la Red. En este estudio, la propagación y las características de dispersión de las microondas sobre la comunicación inalámbrica *WiMAX* es analizado tomando en cuenta varios métodos.

Cuando se habla de propagación de señal hay que tomar en cuenta que la atmósfera de la Tierra introduce pérdidas de la señal que no se encuentran en el vacío, estas se propagan a través de cualquier material dieléctrico como el aire, pero no se propagan bien cuando existen conductores, materiales u obstáculos con pérdidas.

Las ondas de comunicación inalámbrica se propagan por la atmósfera terrestre con energía transmitida por la fuente, posteriormente la energía se recibe del lado de la antena receptora. La radiación y la captura de esta energía son funciones de las antenas y de la distancia entre ellas. [14]

2.2. Parámetros importantes de propagación

Dentro de las características del estudio se analiza que la obstrucción está compuesta por un material homogéneo y tiene una superficie lisa. Las ondas electromagnéticas al chocar con una superficie de este tipo son afectadas por varios fenómenos. Los más comunes son:

- Reflexión
- Refracción

- Difracción
- Esparcimiento

2.2.1. Reflexión y Refracción

Esta característica de las ondas electromagnéticas es primordial en el presente estudio ya que se trabaja con señales inalámbricas que viajan a través del medio en este caso el aire, se produce este fenómeno cuando la señal transmitida desde la radio base llega o no a la estación suscriptora o en otro caso parte de esta energía de la onda incidente al chocar con la frontera entre ambos materiales ve su energía dividida en dos direcciones. La onda que atraviesa la frontera se conoce como onda refractada y la onda que retorna al medio original es la onda reflejada. Este parámetro de las señales transmitidas pueden verse refractadas o reflejadas por medio de obstáculos planos como es el caso de edificios en los cuales se producen estos fenómenos.

Para determinar la energía que atraviesa y la que se refleja sobre la frontera entre ambos materiales debemos calcular los coeficientes de transmisión o refracción y reflexión. Los ángulos θ_1 y θ_2 pueden ser diferentes dependiendo de los valores de permitividad de cada material. El ángulo incidente es igual al ángulo reflejado en la reflexión. El ángulo refractado θ_2 nos indica que la onda al atravesar de un material a otro cambia de dirección.

En la figura 2.3 se puede observar los ángulos θ_1 y θ_2 los cuales corresponden a los coeficientes de reflexión y refracción.

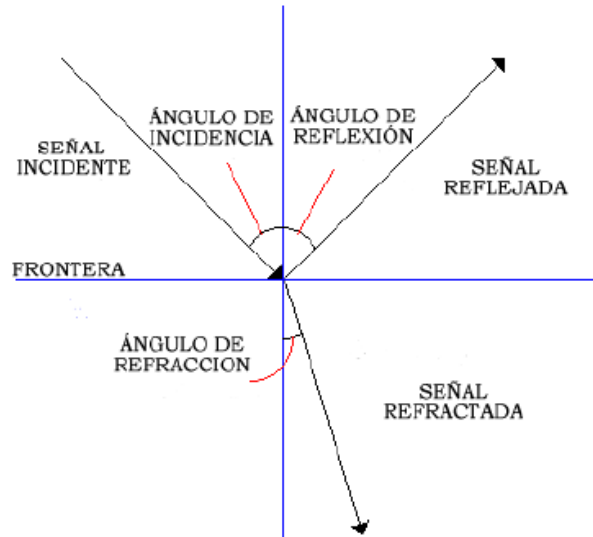


Figura 2.3. Ángulos de reflexión θ_1 y refracción θ_2

2.2.2. Difracción

La difracción es un fenómeno de redistribución de la energía cuando existen obstrucciones que no permiten el paso de las ondas electromagnéticas. Permite que la señal se propague en torno a esquinas, usando el principio de *Huygens*, en el cual las ondas electromagnéticas llegan a pesar de no existir línea de vista. En el caso del entorno de la ESPE cuando la señal choca contra edificaciones, árboles o cualquier obstáculo la señal se propaga en ondas secundarias. Las señales y la intensidad de esta, que se recibe en zonas detrás de las obstrucciones debido a la difracción es la suma de las ondas secundarias que van en su dirección.

En la figura 2.4 se observa el principio de *Huygens* en el caso específico del Campus Politécnico de la ESPE donde se da este fenómeno.

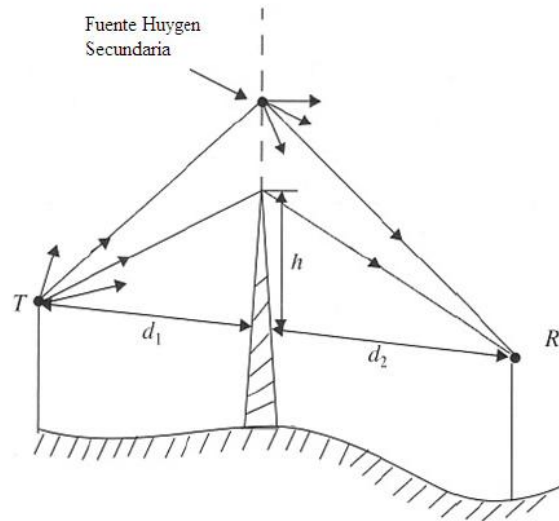


Figura 2.4. Fenómeno de difracción

Es el fenómeno que ocurre cuando la señal que viaja en el espacio golpea una superficie rugosa o áspera ocasionando que la señal se disperse hacia varias direcciones.

2.2.3. Esparcimiento

En la figura 2.5 se ve que dependiendo del ángulo de incidencia, la forma de la superficie y la frecuencia de la energía que se re-irradia puede tomar diferentes direcciones y orientación de los patrones de esparcimiento.

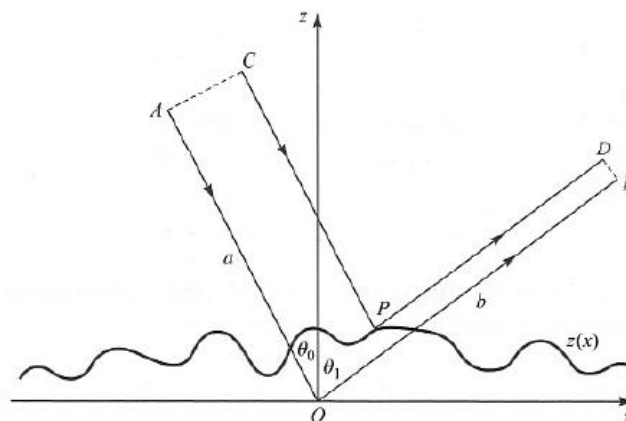


Figura 2.5. Principio de Esparcimiento

Cuando se habla de este fenómeno cabe recalcar que se tiene un material diferente a un plano como en el otro caso, el esparcimiento es el último de los procesos a los que puede ser sometida la onda electromagnética al golpear un objeto. El grado de dispersión depende del ángulo de incidencia.

En los equipos de medición del presente estudio, el analizador de espectros Anritsu recibe una señal la cual es una combinación de diferentes rutas que toman los distintos componentes al chocar con obstrucciones. Al experimentar los fenómenos que se presentan con anterioridad la señal disminuye su potencia considerablemente por encima del nivel de atenuación causado por la pérdida de espacio libre.

2.2.4. Interferencia

Podemos hablar de este término siempre y cuando existan frecuencias parasitas a nuestra red de comunicación, con esto se quiere decir que en el Campus existan sistemas o antenas que trabajen en la banda de 5GHz lo cual produce que la red o la Radio Base no funcionen en sus parámetros normales.

Esta es producida siempre que se combinan dos o más ondas electromagnéticas a igual frecuencia, de tal manera que se degrada el funcionamiento del sistema. La interferencia está sujeta al principio de superposición lineal de las ondas electromagnéticas, y se presenta siempre que dos o más ondas ocupan el mismo punto del espacio en forma simultánea. [13]

2.2.5. Regiones de Campo Cercano y Lejano de una Antena

En el caso de la antena de la Radio Base como se especificó en el anterior capítulo es una antena omnidireccional, en la cual la señal es orientada en todas las direcciones con un haz amplio, el cual envía información a los 360 grados por lo que es posible establecer enlace

con cualquier punto dentro del Campus. Su alcance es el necesario para las características de nuestra Red.

Se puede analizar en este punto el comportamiento de radiación de la antena, el cual va cambiando rápidamente conforme la distancia se incrementa. En la región de campo cercano predominan los campos de radiación y su distribución angular de la distancia que hay a la antena de la Radio Base, la cual se ubicó estratégicamente para que todo el sistema esté dentro del campo cercano.

2.2.6. Atenuación

La señal de la radio base al propagarse por el medio se atenúa a una razón proporcional al cuadrado de la distancia recorrida. Esta magnitud depende de dos valores, la distancia y la frecuencia, para la red actual la frecuencia es un valor constante de en la banda de 5 GHz, la distancia es un valor que cambia según la posición de los equipos. El valor exacto de atenuación se calcula utilizando la ecuación 2.1 la cual corresponde a las pérdidas de espacio libre en expresada en decibels:

$$L = 32.44 + 20 \log f + 20 \log d \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

f = frecuencia en MHz que es un valor constante de 5500 MHz

d = distancia en Km

Esta ecuación es válida para ambientes donde la onda electromagnética viaja en un material homogéneo donde debe existir una trayectoria directa sin obstrucciones (LOS).

2.3. Modelos de propagación

Es indispensable analizar todos los modelos de propagación propuestos para este tipo de red ya que con la entrada de múltiples marcas al mercado, cada red presenta sus propias características de propagación y los modelos cambian principalmente según la frecuencia, el entorno, la distancia y al ambiente, entre otros parámetros.

Desde el punto de vista del diseño de una red *WiMAX*, especialmente en lo concerniente a la cobertura que desea lograr un proveedor de servicio es importante tener un modelo de predicción de pérdidas de propagación de ondas. Estos modelos permiten con cierta exactitud determinar cuál va a ser la pérdida de potencia que afectará a una señal al propagarse en un ambiente urbano. Este valor de pérdida es importante para determinar el rango de cobertura de la Radio Base, y de esta manera determinar límites para la red de transporte *WiMAX*.

Mientras más exacto sea nuestro modelo de predicción, con mayor exactitud podremos determinar cuántas estaciones suscriptoras se deben instalar para cubrir la región de interés. Para hallar el modelo que más se aproxime a la realidad se deberá estudiar otros que hayan sido propuestos para así analizar el que mejor se acople a nuestra red.

Actualmente existe gran variedad de modelos que han sido desarrollados para dar soluciones particulares a los problemas que surgen en cada caso y ambiente de aplicación específico.

En general las soluciones planteadas han ofrecido hasta el momento un modelamiento de curvas similares sin embargo existe una notable diferencia en cada modelo, relacionado a las constantes que cambian según la red en estudio.

Modelos de propagación NLOS

Para el análisis del modelo de propagación a ser obtenido, tomamos en cuenta los parámetros que dependen de variables como: terreno, densidad del bosque, altura de los edificios, altura de la antena, la ganancia, velocidad del viento y de la estación del año o ambiente, todos estos parámetros provocan un cambio en la propagación.

En una condición de canal NLOS, la señal puede sufrir difracción, cambios de polarización y deterioro por reflexión. Estos factores afectan la intensidad de la señal recibida y los deterioros no están normalmente presentes cuando el transmisor y receptor poseen la condición LOS.

A través de los años fueron desarrollados varios modelos los cuales intentaron caracterizar este entorno de RF y realizar predicciones de las intensidades de RF. Estos modelos basados en mediciones empíricas son usados para predecir coberturas de gran escala para sistemas de radiocomunicaciones en aplicaciones de redes *WiMAX*. Desafortunadamente ninguno de estos enfoques direcciona las necesidades de los enlaces fijos de banda ancha de manera adecuada.

AT&T Wireless recolectó extensos datos de campo de diferentes áreas de Estados Unidos para fijar más precisamente el entorno fijo inalámbrico. El modelo de *AT&T Wireless* desarrollado desde los datos ha sido validado en contraste con sistemas inalámbricos fijos que han arrojado resultados comparables. Este modelo es la base de un modelo industrial aceptado y es usado por los cuerpos de estudio como el IEEE 802.16. El modelo de pérdida de trayecto de *AT&T Wireless* incluye parámetros para altura de antenas, frecuencias portadoras y tipos de terreno.

Para los ambientes suburbanos este modelo utiliza el método de Hata-Okumura, que sólo es válido para el rango de frecuencia entre 500-1500 MHz y para distancias entre el receptor y la estación base mayor a 1 Km.

2.3.1. Tipos de Modelos

En función de las características físicas de una zona (terreno) se han desarrollado modelos de predicción de pérdidas en el ambiente de propagación. Los modelos se pueden clasificar en:

- Determinísticos
- Estadísticos

Los modelos determinísticos utilizan un modelo físico de la zona donde se quiere calcular el nivel de señal recibido y con ellos tratamos de representar la interacción de las ondas propagadas con cada objeto. Esta técnica se conoce como trazado de haces (por su inglés *Ray Tracing*) donde se modela cada camino que pueda tomar una onda electromagnética irradiada por la antena transmisora. [11]

Los modelos estadísticos se desarrollan a partir de mediciones realizadas en el campo. En base a estas mediciones se extrae un modelo matemático donde y en función de ciertos parámetros como frecuencia, distancia, tipo de terreno, altura de antenas, entre otros permiten predecir la pérdida encontrada en el campo.

Los modelos estadísticos son más populares que los determinísticos ya que son más sencillos de utilizar y no requieren de un mapa detallado de la zona de interés.

El modelo específico que vamos a utilizar, es el tipo estadístico, ya que se tomará medidas en todo el Campus y al analizar cada una de las medidas, el ambiente y la distancia se hallará el modelo para nuestra Red.

De los diferentes modelos de propagación que se conoce, se han seleccionado los siguientes que se ajustan a los requerimientos de la red a diseñar, los cuales son:

- Modelo de propagación en Espacio Libre (*Free Space*).
- Modelo de propagación Okumura.
- Modelo de propagación de Okumura-Hata.
- Modelo de propagación COST 231 Okumura-Hata.
- Modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami (C231 W-I).
- Modelo de propagación SUI.

2.3.2. Modelo de propagación en Espacio Libre (Free Space)

Se analiza este tipo de modelo matemático ya que es un modelo de propagación general y básico que elementalmente representa el rango de comunicación como un círculo de radio d , alrededor del transmisor. Si un receptor se encuentra dentro del círculo, éste recibe todos los paquetes ya que de otra forma éste pierde todos los paquetes. [14]

Todo sistema de telecomunicación debe diseñarse para que en el receptor se obtenga una relación señal-ruido mínima que garantice su funcionamiento. Para la correcta planificación de un modelo matemático resulta esencial conocer los factores que pueden alterar la propagación electromagnética, su magnitud y su influencia en las distintas bandas de frecuencias.

Cuando se habla de este tipo de ejercicio matemático se considera un modelo ideal relacionado con las condiciones de propagación en el vacío, pero para el estudio que se está desarrollando en un entorno terrestre con obstáculos no es muy aplicado, debido a que la curvatura de la tierra, la atmósfera y la ionosfera alteran las condiciones de propagación para enlaces reales.

En condiciones de propagación de espacio libre, la relación entre la potencia recibida y la transmitida (pérdida de transmisión) por dos antenas separadas una distancia d es:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Donde:

$\lambda = \frac{c}{f}$, representa la longitud de onda.

P_t es la potencia de la señal de transmisión.

G_t y G_r son las ganancias de las antenas receptoras y respectivamente.

L es la pérdida del sistema donde ($L \geq 1$).

Es común seleccionar $G_t = G_r = 1$ y $L = 1$ en ns de simulación.

c es la velocidad de la luz igual a 3×10^8 m/s y f la frecuencia de operación en Hz.

Cuando se tiene una antena con características fijas como el caso de la Radio Base y considerando este modelo se provoca una disminución de las pérdidas de transmisión.

Si se convierten las pérdidas a decibeles y dando valores a las constantes c , G_t , G_r y L se simplifican los cálculos, entonces la ecuación queda igual a la expresión que se realizó anteriormente para la atenuación, en la expresión 2.1:

$$L = 32.44 + 20 \log f + 20 \log d$$

Con distancia en kilómetros y frecuencia en MHz.

2.3.3. Modelo de propagación Okumura

El modelo de propagación Okumura es uno de los modelos más utilizados en la predicción de señales en ambientes urbanos, en sistemas con tecnología *WiMAX*. Usado para propagación en ambientes con grandes edificaciones y ambientes variados, basado en pruebas empíricas.

Se basa en curvas desarrolladas por Okumura, las cuales entregan la atenuación relativa al espacio libre. Estas curvas fueron obtenidas en base a numerosas pruebas de propagación hechas por Okumura en ambientes urbanos con un terreno casi plano.

Para frecuencias entre 100 MHz y 3000 MHz y distancias entre 1 km. y 100 km.

$$L[\text{dB}] = L_f + A_{mu}(f, d) - G(h_{tx}) - G(h_{rx}) - G_{AREA} \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Donde:

L_f : Atenuación espacio libre.

$A_{mu}(f, d)$: Atenuación relativa promedio (curvas).

$G(h_{tx})$: Ganancia de la antena de transmisión con altura h_{tx} .

$G(h_{rx})$: Ganancia de la antena de recepción con altura h_{rx} .

G_{AREA} : Ganancia debido al tipo de ambiente.

Las pruebas realizadas por Okumura demostraron que la ganancia de la altura de la antena de transmisión varía a un índice de 20 dB por década y la ganancia de la antena receptora varía a un índice de 10 dB por década para alturas menores a 3 m, por lo que queda:

$$G(h_{tx}) = 20 \log\left(\frac{h_{tx}}{200}\right), \text{ para } 10 \text{ m} < h_{tx} < 1000 \text{ m} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Según las características de la red *WiMAX* del Campus la expresión que se adapta a la red es la siguiente:

$$G(h_{rx}) = 10 \log\left(\frac{h_{rx}}{3}\right), \text{ para } h_{rx} < 3 \text{ m} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

La atenuación relativa promedio es obtenida de las curvas diseñadas por Okumura, las curvas se muestran en la figura 2.6.

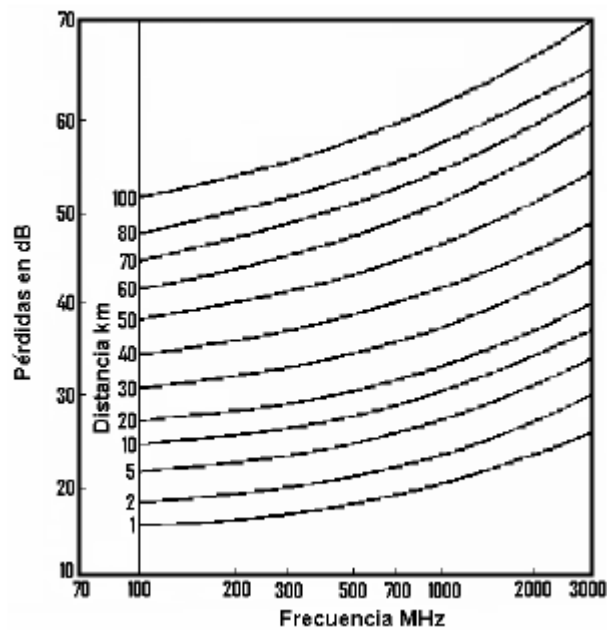


Figura 2.6. Curvas de atenuación relativa de Okumura

Basándose en curvas de pérdidas obtenidas en pruebas, Okumura desarrolló el modelo, en el cual también consideró el tipo de terreno.

Pese a que es un modelo simple, es muy utilizado por su buenas predicciones en ambientes poblados. Este modelo no funciona bien para ambientes rurales. Es por este motivo que este modelo sirve como fuente para desarrollar otros modelos con ciertas modificaciones pero no es aplicable a nuestro sistema.

2.3.4. Modelo de propagación de Okumura-Hata

Modelo empírico, limitado en frecuencias, ya que es efectivo hasta 1500 MHz. A pesar de las limitaciones, la aplicabilidad del modelo de Okumura-Hata es válida en frecuencias superiores pero con incremento de pérdidas que está en un rango aceptable. Esta expresión ha sido implementado en la herramienta de planificación *WiMAX* por su uso extendido y a modo comparativo. Además, el modelo de Okumura-Hata permite diferenciar la propagación en entornos urbanos, suburbanos o rurales. Las pérdidas consideradas por este modelo están dadas por la ecuación 2.6:

$$L = 69,55 + 26,16 \log(f_c) - 13,82 \log(h_{tx}) - a(h_{rx}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{tx})) \log d$$

(Ecuación 2.6)

Donde:

f_c : Frecuencia de la portadora en MHz.

h_{tx} : Altura de la antena transmisora en metros, válido para $30 \text{ m} < h_{tx} < 200 \text{ m}$.

h_{rx} : Altura antena receptora en metros, válido para $1 \text{ m} < h_{rx} < 10 \text{ m}$.

$a(h_{rx})$: Factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil, depende del tipo de ciudad.

d : Distancia entre transmisor y receptor en km.

El factor de corrección de altura puede tomar distintos valores dependiendo del ambiente en el cual se desarrolle el estudio de propagación, entonces $a(h_{rx})$ se define:

Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_{rx})[dB] = (1,1 \log[f_c] - 0,7)h_{rx} - (1,56 \log[f_c] - 0,8) \quad \text{(Ecuación 2.7)}$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_{rx})[dB] = 3,2(\log[11,75h_{rx}])^2 - 4,97 \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Aunque el modelo está definido para ambientes urbanos, también existen correcciones para el cálculo de las pérdidas en ambientes suburbanos y rurales, los cuales se muestran en las siguientes ecuaciones:

Para áreas suburbanas:

$$L[dB] = L(\text{urbano}) - 2 \left(\log \left[\frac{f_c}{28} \right] \right)^2 - 5,4 \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Para áreas rurales:

$$L[dB] = L(\text{urbano}) - 4,78(\log[f_c])^2 + 18,33 \log(f_c) - 40,94 \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Para identificar el valor de la expresión de Okumura-Hata reemplazamos las expresiones en el modelo general y con los valores constantes hallamos la ecuación general de propagación de este modelo en un ambiente suburbano. Para el estudio se escoge el factor de corrección de la altura para ciudades pequeñas y medianas

En la ecuación 2.7 se reemplaza valores de constantes como h_{rx} que para este caso es 2,5 que es la altura promedio de la persona con el equipo de prueba de medida de la señal y se obtiene:

$$\begin{aligned} a(h_{rx})[dB] &= (1,1 \log[f_c] - 0,7)h_{rx} - (1,56 \log[f_c] - 0,8) \\ a(h_{rx})[dB] &= (1,1 \log[f_c] - 0,7)2,5 - (1,56 \log[f_c] - 0,8) \\ a(h_{rx})[dB] &= 1,19 \log[f_c] - 0,95 \quad (\text{Ecuación 2.11}) \end{aligned}$$

En la ecuación 2.6 reemplazamos el valor de la altura de la Radio Base la cual es la suma entre el edificio de posgrados y la torre que nos da un total de 13 m. Y adaptamos a esta ecuación la expresión 2.11 de la corrección de la altura de recepción

$$L = 69,55 + 26,16 \log(f_c) - 13,82 \log(h_{tx}) - a(h_{rx}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{tx})) \log d$$

$$L = 69,55 + 26,16 \log(f_c)$$

$$- 13,82 \log(13) - 1,19 \log[f_c] + 0,95 + (44,9 - 6,55 \log(13)) \log d$$

$$L = 55,11 + 24,97 \log(f_c) + 37,6 \log d \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

Es necesario obtener la ecuación final de propagación de este modelo por lo tanto se reemplaza la ecuación 2.12 en la expresión 2.9.

$$L[dB] = L(\text{urbano}) - 2 \left(\log \left[\frac{f_c}{28} \right] \right)^2 - 5,4$$

$$L[dB] = 55,11 + 24,97 \log(f_c) + 37,6 \log d - 2 \left(\log \left[\frac{f_c}{28} \right] \right)^2 - 5,4$$

$$L[dB] = 49,71 + 24,97 \log(f_c) + 37,6 \log d - 2(\log f_c - \log 28)^2$$

$$L[dB] = 49,71 + 24,97 \log(f_c) + 37,6 \log d - 2(\log f_c - 1,447)^2$$

$$L[dB] = 49,71 + 24,97 \log(f_c) + 37,6 \log d - 2[(\log f_c)^2 - 2,894 \log f_c + 2,094]$$

$$L[dB] = 45,522 - 2(\log f_c)^2 + 30,758 \log(f_c) + 37,6 \log d \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Se trabaja de mejor manera si se transforma las unidades de la expresión 2.13, en esta nueva ecuación la frecuencia está en GHz y la distancia en m.

$$L[dB] = 45,522 - 2(\log f_c 10^3)^2 + 30,758 \log(f_c 10^3) + 37,6 \log(d 10^{-3})$$

$$L = 6,996 - 2(\log f_c)^2 + 18,758 \log(f_c) + 37,6 \log(d) \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

Como conclusión final y para analizar resultados, la ecuación del modelo matemático comparamos con la de otros modelos de propagación.

2.3.5. Modelo de propagación COST 231 Ohumura-Hata

Con el incremento de usuarios y la evolución de los servicios ofrecidos se comenzaron a utilizar otras bandas superiores a 1500 MHz. Debido a este fenómeno el grupo europeo COST 231 propuso un nuevo modelo que complementa el modelo Hata y que es válido para frecuencias entre superiores a 1500 MHz. Para el caso del proyecto este modelo se acomoda ya que se acopla a las características de la red, una de ellas y la más importante es la frecuencia a la que trabaja la Radio Base que es 5,5 GHz, en este rango este modelo tiene la precisión necesaria para realizar el análisis del actual estudio.

El modelo COST 231 Hata, fue creado por la Cooperativa Europea para la Investigación Científica y Técnica (EURO COST). Es una combinación de simulaciones y data empírica (estadística). Con el fin de tener una mejor correspondencia con las curvas de Okumura en un rango mayor de frecuencias. El modelo tiene un comportamiento similar con el modelo Okumura-Hata para ciudades urbanas medias, con edificios y calles pequeñas y medianas.

El modelo de pérdidas por propagación se expresa en la ecuación 2.15:

$$L_p = 46,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_b) - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log(h_b)) \log d + C_m$$

(Ecuación 2.15)

Donde:

h_m : es la altura de la antena del receptor para el estudio es el analizador de espectros.

h_b : es la altura de la antena de la Radio Base en m.

C_m : es un factor de corrección para tomar en cuenta el ambiente de propagación.

f_c : frecuencia de la portadora en MHz.

d: Distancia entre transmisor y receptor en km.

En la tabla 2.1 se observa los valores para el factor de corrección para tomar en cuenta el ambiente de propagación.

Tabla 2.1. Valores C_m factor de corrección para tomar en cuenta el ambiente de propagación

Entorno	C_m [dB]
Para ciudades urbanas densas (Edificios altos de más de 7 pisos)	3
Para ciudades urbanas medias (Edificios más pequeños con calles pequeñas y medianas)	0
Para ciudades urbanas medias con calles anchas	-5
Para entornos suburbanos con pequeños edificios	-12
Para entornos mixtos, pueblo y rural	-20
Para entornos rurales con pocos árboles y casi sin colinas	-26

El factor de corrección de altura puede tomar distintos valores dependiendo del ambiente en el cual se desarrolle el estudio de propagación, entonces $a(h_m)$ para la red *WiMAX* se define de la ecuación 2.7, con un h_m promedio de 2,5 m, la cual toma el mismo valor que la ecuación 2.11.

$$a(h_m)[dB] = (1,1 \log[f] - 0,7)h_m - (1,56 \log[f] - 0,8)$$

$$a(h_m)[dB] = (1,1 \log[f] - 0,7)2,5 - (1,56 \log[f] - 0,8)$$

$$a(h_m)[dB] = 1,19 \log[f] - 0,95$$

La ecuación 2.15 se desarrolla con el factor de corrección de altura y el factor de ambiente de propagación que para el caso del presente análisis es para entornos suburbanos con mediana densidad de edificios que corresponde al valor de -12 dB.

$$L_p = 46,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_b) - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log(h_b)) \log d + C_m$$

$$L_p = 46,3 + 33,9 \log(f)$$

$$- 13,82 \log(13) - 1,19 \log[f] + 0,95 + (44,9 - 6,55 \log(13)) \log d - 12$$

$$L_p = 19,855 + 32,71 \log f + 37,604 \log d \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

Aunque el modelo está definido para ambientes urbanos, también existen correcciones para el cálculo de las pérdidas en ambientes suburbanos y rurales, se utiliza la ecuación 2.9 para entornos suburbanos. Reemplazando la expresión 2.16 se obtiene la ecuación final de propagación:

$$L[dB] = L(\text{urbano}) - 2 \left(\log \left[\frac{f_c}{28} \right] \right)^2 - 5,4$$

$$L[dB] = 19,855 + 32,71 \log f + 37,604 \log d - 2 \left(\log \left[\frac{f_c}{28} \right] \right)^2 - 5,4$$

$$L[dB] = 14,455 + 32,71 \log f + 37,604 \log d - 2(\log f_c - \log 28)^2$$

$$L[dB] = 14,455 + 32,71 \log f + 37,604 \log d - 2(\log f_c - 1,447)^2$$

$$L[dB] = 14,455 + 32,71 \log f + 37,604 \log d - 2[(\log f_c)^2 - 2,894 \log f_c + 2,094]$$

$$L[dB] = 10,267 - 2(\log f)^2 + 38,498 \log(f) + 37,6 \log d \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

Se trabaja de mejor manera si se transforma las unidades de la expresión 2.17, en esta nueva ecuación la frecuencia esta en GHz y la distancia en m.

$$L[dB] = 10,267 - 2(\log f 10^3)^2 + 38,498 \log f 10^3 + 37,6 \log(d 10^{-3})$$

$$L[dB] = 10,267 - 2(\log f + 3)^2 + 38,498 (\log f + 3) + 37,6(\log d - 3)$$

$$L[dB] = 10,267 - 2((\log f)^2 + 6 \log f + 9) + 38,498 (\log f_c + 3) + 37,6 \log(d 10^{-3})$$

$$L[dB] = -5,039 - 2(\log f)^2 + 26,498 \log(f) + 37,6 \log(d) \quad (\text{Ecuación 2.18})$$

Este modelo tiene el mejor desempeño (mayor precisión) en distancias entre 1 km y 20 km. Una de las aportaciones de este modelo para el buen desempeño de la red es que la expresión puede considerar pérdidas por dispersión. Con esta ecuación se realiza las comparaciones luego de obtener el modelo propio de la red.

2.3.6. Modelo de propagación COST 231 Walfisch-Ikegami (C231 W-I)

Este modelo es la combinación de los modelos Walfisch-Bertoni y el modelo Ikegami con correcciones empíricas en algunos parámetros. Este modelo está restringido a terrenos urbanos planos, pero funciona de mejor manera que cualquier otro para entornos como el caso del Campus de la Universidad, aunque sus expresiones resultan ser más complejas. Considera la difracción descendente hasta el nivel de las calles y algunos factores empíricos de corrección para incorporar acuerdos, con referencia a mediciones.

Sin embargo, este modelo es aún de tipo estadístico y no determinístico, ya que sólo puede considerar valores característicos del entorno y no valores específicos provenientes de bases de datos topográficas, lo cual conllevó a la realización de aproximaciones y promedios durante el diseño del algoritmo para el cálculo de las pérdidas basándose en el entorno y el ambiente.

Este modelo está fundamentado en varios parámetros urbanos tales como densidad de edificios, altura promedio de las construcciones, altura de la antena transmisora y ancho de las calles, separación de los edificios, dirección de las calles con respecto a la trayectoria de la antena. La altura de la antena es generalmente más alta que la altura promedio del edificio, de tal forma que las señales son guiadas a través de la calle, simulando un ambiente urbano tipo cañón.

A continuación se hacen explícitas algunas relaciones que se desprenden de la diferencia de alturas, y que son utilizadas en las distintas expresiones del modelo. Corresponden a las expresiones 2.19 y 2.20 respectivamente.

$$\Delta h_m = h_{techo} - h_m \quad (\text{Ecuación 2.19})$$

$$\Delta h_b = h_{base} - h_{techo} \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

En la figura 2.7 se puede observar los parámetros que intervienen en el modelo C231 W-I para utilizar en las distintas expresiones del mismo.

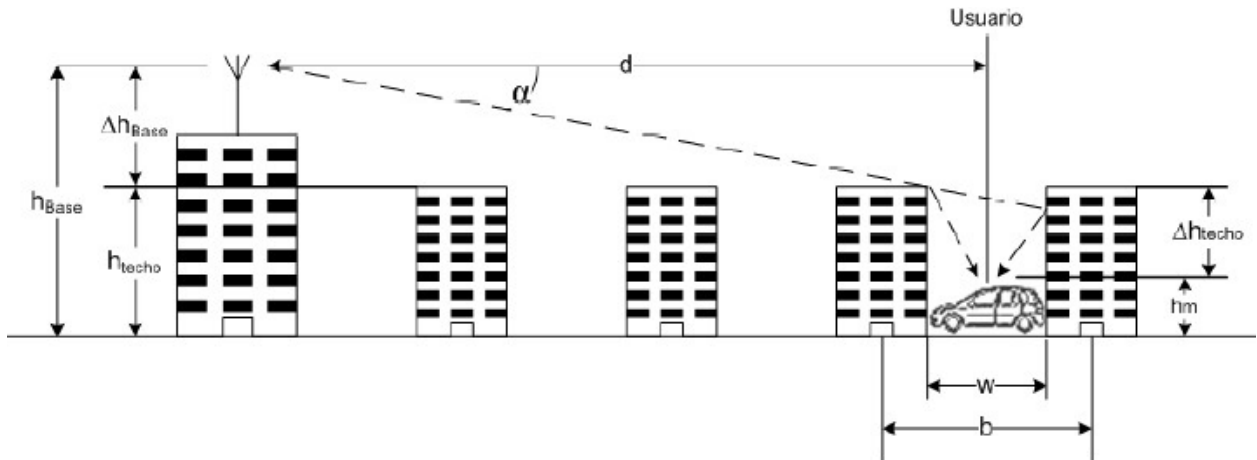


Figura 2.7. Parámetros que intervienen en el modelo C231

En este modelo se distinguen diferentes expresiones para las pérdidas por propagación, dependiendo de si existe o no línea de vista (LOS). En el caso de LOS se aplica una fórmula simple para las pérdidas de propagación, diferente a la aplicada en el caso del espacio libre, la cual se basa en mediciones llevadas a cabo en la ciudad de Estocolmo y está dada por la ecuación 2.21.

$$L_b(dB) = 42,6 + 26 \log(d) + 20 \log(f) \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

Para $d \geq 20m$, d expresada en km y f expresada en MHz.

Para condiciones NLOS sin línea de vista el total de pérdidas está dado por:

$$L_b = L_o + L_{rts} + L_{msd} \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

Donde:

L_o : son las pérdidas por el espacio libre

L_{rts} : son las pérdidas por difracción de multiples filos de cuchillo antes del techo del edificio final.

L_{msd} : las pérdidas debidas a una única difracción final hacia el nivel de calle, ocasionada por el techo del último edificio, y un proceso de dispersión ocurrido a esta altura.

L_b dará un valor mínimo de L_o cuando $L_{rts} + L_{msd} \leq 0$ y en otros casos puede llegar a ser negativo. Las pérdidas por espacio libre están dadas por la ecuación 2.1:

$$L_o = 32.44 + 20 \log f + 20 \log d$$

La determinación de L_{rts} se basa principalmente en el modelo de Ikegami, teniendo en cuenta el ancho de las calles y su orientación. Sin embargo, el COST 231 aplicó otra función de la orientación para las vías, diferente a la de Ikegami, resulto en:

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log(w) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_m) + L_{Ori} \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

Donde:

w : es la distancia entre las caras de los edificios ubicados a los lados de la calle donde se encuentra el equipo de medición Anritsu, típicamente este valor es $b/2$ y se expresa en metros, para la ESPE este valor es de 30 m

f en MHz y Δh_m en metros.

L_{Ori} : este término considera la orientación de las calles a un ángulo específico como se indica en la ecuación 2.24:

$$L_{Ori} = 2,5 + 0,075(\varphi - 35) \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

Se escogió la ecuación 21 entre varias para L_{Ori} ya que el ángulo φ para el presente estudio está entre 35° y 55° , este ángulo incide entre el equipo de medición y la estación base, como se muestra en la siguiente figura 2.8 donde $\varphi = 45$ y es la inclinación del equipo.

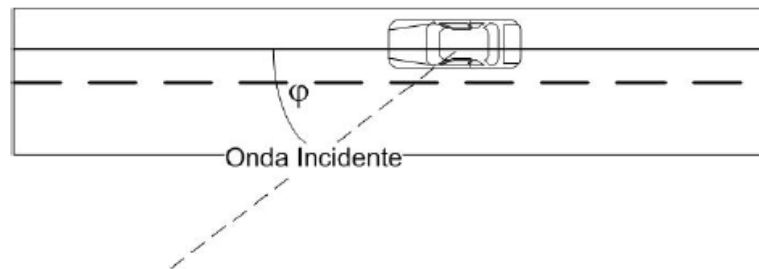


Figura 2.8. Ángulo de incidencia entre la onda, desde la estación base y el equipo receptor

El término L_{msd} corresponde a otro tipo de pérdidas, la expresión corresponde a una integral cuya solución fue encontrada en forma aproximada en el modelo Walfisch-Bertoni, para el caso en que la altura de la antena de la estación base es mayor que el promedio de las techumbres. Luego el grupo COST 231 extendió esta solución para el caso en que la altura de la antena de la estación base es menor que el promedio de las techumbres incluyendo funciones empíricas. La expresión para L_{msd} es la siguiente. [8]

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \log(d) + K_f \log(f) - 9 \log(b) \quad (\text{Ecuación 2.25})$$

Donde b corresponde a la distancia promedio entre edificios medido en metros, para el caso del Campus Politécnico este valor corresponde a 60 m, d en Km y f en MHz. Los demás parámetros son descritos a continuación cuando la altura de la estación base es mayor a la altura de los demás edificios. Se escoge este parámetro ya que la ubicación de la antena es en la terraza del edificio de postgrados con una torre que da una altura total de 13 m, que es mayor en comparación a la altura promedio de los demás edificios que es 5 m.

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_b) \quad (\text{Ecuación 2.26})$$

$$K_a = 54$$

$$K_d = 18$$

K_f Para ciudades medianas o centros suburbanos con una densidad moderada de árboles:

$$K_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (\text{Ecuación 2.27})$$

K_f Para ciudades con grandes tramas urbanas como centros metropolitanos:

$$K_f = -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (\text{Ecuación 2.28})$$

El término K_a representa el incremento de las pérdidas en la trayectoria debido a una antena de la radio base ubicada a una altura menor a la de los techos de los edificios adyacentes. Pero el modelo se comporta de forma adecuada para situaciones donde la altura de la antena de la Estación Base es mayor a la de los edificios. Los términos K_d y K_f controlan la dependencia del L_{msd} de la distancia y la frecuencia. [8]

Para identificar la ecuación de este modelo que se va a utilizar reemplazamos todos los valores descritos y las constantes respectivas en la ecuación general. Se halla las alturas con respecto al techo de la estación base y receptora con las ecuaciones 2.19 y 2.20 respectivamente.

$$\Delta h_m = h_{techo} - h_m$$

$$\Delta h_m = 5 - 2,5$$

$$\Delta h_m = 2,5 \quad (\text{Ecuación 2.29})$$

$$\Delta h_b = h_{base} - h_{techo}$$

$$\Delta h_b = 13 - 5$$

$$\Delta h_b = 8 \quad (\text{Ecuación 2.30})$$

Los términos L_{msd} y K_f se describen a continuación donde K_f corresponde a la constante cuando se habla de ciudades medianas y centros suburbanos con media densidad de árboles. Con estos valores se describe L_{msd} .

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_b) \quad (\text{Ecuación 2.31})$$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + 8)$$

$$L_{bsh} = -17,176 \quad (23.1)$$

$$K_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (\text{Ecuación 2.32})$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + K_a + K_d \log(d) + K_f \log(f) - 9 \log(b)$$

$$L_{msd} = -17,176 + 54 + 18 \log(d) + \left[-4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \right] \log(f) - 9 \log(60)$$

$$L_{msd} = 20,821 + 18 \log(d) + \left[-4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \right] \log(f) \quad (\text{Ecuación 2.33})$$

Se halla el valor de la orientación de la calle para identificar la ecuación de L_{rts} que corresponde a las pérdidas por difracción de múltiples obstáculos antes del techo del edificio final.

$$L_{Ori} = 2,5 + 0,075(\varphi - 35)$$

$$L_{Ori} = 2,5 + 0,075(45 - 35)$$

$$L_{Ori} = 3,25 \quad (\text{Ecuación 2.34})$$

$$\begin{aligned}
L_{rts} &= -16,9 - 10 \log(w) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_m) + L_{Ori} \\
L_{rts} &= -16,9 - 10 \log(30) + 10 \log(f) + 20 \log(2,5) + 3,25 \\
L_{rts} &= -20,462 + 10 \log(f) \quad (\text{Ecuación 2.35})
\end{aligned}$$

Con todas las expresiones que corresponden al modelo matemático COST 231 se reemplaza en la ecuación 2.22 y se halla el modelo general L_b que corresponde a la expresión 2.36:

$$\begin{aligned}
L_b &= L_o + L_{rts} + L_{msd} \\
L_b &= 32,44 + 20 \log f + 20 \log d - 20,462 + 10 \log(f) + 20,821 \\
&\quad + 18 \log(d) + \left[-4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \right] \log(f) \\
L_b &= 32,799 + 25,3 \log(f) + \frac{f}{1321,429} \log(f) + 38 \log(d) \quad (\text{Ecuación 2.36})
\end{aligned}$$

Para obtener el modelo matemático final de propagación que representa las pérdidas que se producen en un sistema *WiMAX* de acuerdo al modelo C231 W-I es necesaria la transformación de dicha expresión, en la cual la frecuencia estará en GHz y la distancia en m. La expresión 2.37 queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
L_b &= 32,799 + 25,3 \log(f10^3) + \frac{f10^3}{1321,429} \log(f10^3) + 38 \log(d10^{-3}) \\
L_b &= -5,301 + 25,3 \log(f) + 0,747f \log(f) + 2,271f + 38 \log(d) \quad (\text{Ecuación 2.37})
\end{aligned}$$

El modelo aplicado para entornos del Campus utiliza todas las ecuaciones antes mencionadas, en general se analiza la última expresión de cada uno de los modelos seleccionados para ser comparados con el algoritmo a diseñarse.

2.3.7. Modelo de propagación SUI

El modelo SUI (*Stanford University Interim Models*), el cual es una extensión del modelo de canal desarrollado por AT&T wireless y Erceg et al., es recomendado por el estándar IEEE 802.16 para la estimación de cobertura en sistemas *WiMAX*.

El modelo SUI se aplica para tres categorías de terreno:

- *Tipo A*: Colinas pequeñas con moderada-alta densidad de árboles.
- *Tipo B*: Colinas grandes con baja densidad de árboles, o plano con moderada-alta densidad de árboles.
- *Tipo C*: Plano con baja densidad de árboles.

Estas categorías de terreno proporcionan un método simple y más exacto para la estimación de la propagación de la señal y pérdidas del medio en condiciones de NLOS. Al ser estadística su naturaleza, el modelo puede representar una gran gama de pérdidas de trayecto experimentadas dentro de una comunicación real en la banda de RF.

Los modelos SUI fueron seleccionados para el diseño, el desarrollo y la prueba de las tecnologías *WiMAX*. Con el uso de estos modelos de canal es posible entonces predecir la cobertura que se puede alcanzar con una estación base configurada de una manera determinada, lo que claramente es un apoyo a las actividades de planeación y diseño de redes *WiMAX*. [15]

Sin embargo, el modelo SUI no considera el perfil entre transmisor y receptor, lo cual puede limitar el uso de este modelo en entornos con relieve accidentado, como es el caso de los entornos rurales.

Una vez establecido las características de este tipo de modelo se procede a la determinación de las ecuaciones que permiten llevar a cabo el cálculo de las pérdidas que se producen durante la transmisión de información por parte de la red *WiMAX*.

Para calcular las pérdidas que se producen en el nivel de la señal debido a la propagación en un ambiente determinado se tiene la siguiente expresión:

$$P_L = A + 10\gamma \log \frac{d}{d_o} + s \quad (\text{Ecuación 2.38})$$

Donde:

P_L representa las pérdidas en dB del nivel de la señal,
 γ es el coeficiente de pérdida de trayectoria, dado por:

$$\gamma = \left(a - bh_b + \frac{c}{h_b} \right) \quad (\text{Ecuación 2.39}),$$

y
$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_o}{\lambda} \right) \quad (\text{Ecuación 2.40})$$

En la cual la altura h_b de la antena de estación base está en el rango de:

$$10\text{m} < h_b < 80 \text{ m}$$

Además la expresión cuenta con algunas constantes que se procede a definir a continuación:

a, b y c Son constantes que dependen del tipo de terreno.

d_o Es una distancia de referencia escogida entre 100 y 1000 m.

s Representa el efecto de *shadowing*, para el cual se asume una distribución normal con desviación estándar entre 8 y 10 dB.

En la tabla 2.2 se muestra los valores de las constantes a emplearse de acuerdo al tipo de terreno en el cual se despliega la red *WiMAX*.

Tabla. 2.2 Parámetros numéricos del modelo de propagación SUI

PARÁMETRO CATEGORÍA DE TERRENO	DEL MODELO		
	A (Colinas pequeñas / Moderada a alta densidad de árboles)	B (Colinas pequeñas / Ligera densidad de árboles o llano/Moderada a alta densidad de árboles)	C (Plano/ Ligera densidad de árboles)
A	4,6	4,0	3,6
b (m-1)	0,0075	0,0065	0,0050
c (m)	12,6	17,1	20,0

Este modelo sólo es válido para el rango de frecuencia entre 500-1500 MHz y para distancias entre el receptor y la estación base mayores a 1 Km. Para el presente proyecto es necesario modificar la ecuación para de esta manera aumentar la confiabilidad del modelo a estudiarse.

Para el caso del modelo de propagación SUI los factores de corrección han sido determinados, considerando frecuencias mayores a los 2 GHz y para una altura de la antena CPE entre 2 y 8 m, de igual forma la expresión de este tipo de modelo de propagación se encuentra en dB y es calculado de la siguiente forma:

$$P_{L\text{modificado}} = P_L + \Delta P_{Lf} + \Delta P_{Lh} \quad (\text{Ecuación 2.41})$$

En la tabla 2.3 se muestra los factores de corrección que intervienen en la Red

Tabla 2.3. Factores de corrección que intervienen en la red

FACTORES DE CORRECCIÓN	FÓRMULA	DEFINICIÓN
Factor de corrección en frecuencia	Ecuación 2.42 $P_{Lf} = 6 \log \frac{f}{2000}$	Donde f está dada en MHz, y considerando frecuencias mayores a 2 GHz
Factor de corrección de la altura del CPE,	Ecuación 2.43 $P_{Lh} = -10,8 \log \frac{h}{2}$	Donde h es la altura del CPE entre 2m y 8m.

Para encontrar la ecuación del modelo matemático SUI que finalmente vamos a utilizar, tenemos que reemplazar todos los valores conocidos a la expresión 2.41 de propagación modificada.

La distancia de referencia (d_o) debe ser menor a la distancia del enlace entre la estación base y las estaciones suscriptoras, la misma que no supera un kilómetro en cuanto a la cobertura en el Campus Politécnico de la ESPE. Por lo tanto d_o se determina como un valor constante de 100.

Reemplazamos todos los valores en las ecuaciones antes mencionadas, para realizar este procedimiento se utiliza la expresión 2.40:

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_o}{\lambda} \right)$$

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_o f}{c} \right)$$

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi 100 f}{3 \times 10^8} \right)$$

$$A = 20 \log(4,188 \times 10^{-6}) + 20 \log f$$

$$A = -107,588 + 20 \log f \quad (\text{Ecuación 2.44})$$

Calculamos el coeficiente de pérdida de trayectoria que representa γ , el mismo que depende de las constantes de diferentes tipos de terreno de la tabla 2.2. Para el caso del

Campus Politécnico se ha seleccionado el tipo C (Relativamente plano con ligera densidad de árboles), debido a que éste cumple con las características del entorno y topografía del Campus.

De la ecuación 2.39 se tiene:

$$\gamma = \left(a - bh_b + \frac{c}{h_b} \right)$$

h_b corresponde a la altura de la Radio Base la misma que se encuentra en el Edificio de Posgrados que tiene un altura promedio de 10 m y con una torre de 3 m que da una altura total de 13 m, con este dato y los valores de a, b y c obtenemos el valor de la ecuación 2.39:

$$\gamma = \left(3,6 - 0,005 * 13 + \frac{20}{13} \right)$$

$$\gamma = 5,073 \quad (\text{Ecuación 2.45})$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 2.38 se obtiene la expresión 2.46:

$$P_L = -107,588 + 20 \log f + 10 * 5,073 \log \frac{d}{d_o} + s$$

s representa el efecto *shadowing*, para el cual se asume un valor comprendido entre 8 y 10 dB, para el caso del Campus de la ESPE, el valor óptimo que se escoge es de 8,2 dB que corresponde al tipo de ambiente, entorno y terreno de la Escuela Politécnica.

$$P_L = -107,588 + 20 \log f + 50,73 \log \frac{d}{100} + 8,2$$

$$P_L = -107,588 + 20 \log f + 50,73 \log d - 101,46 + 8,2$$

$$P_L = -107,588 + 20 \log f + 50,73 \log d - 101,46 + 8,2$$

$$P_L = -200,848 + 20 \log f + 50,73 \log d \quad (\text{Ecuación 2.46})$$

Ahora se procede con los valores de corrección, para la ecuación 2.43 de la altura de la recepción comprendida entre 2 y 8 m, se ha seleccionado un valor de 2.5 m, debido a que éste es un valor promedio de la altura del equipo que recepta la señal de la Radio Base, esta altura es la suma del tamaño de la persona que realiza las medidas con el analizador de espectros.

$$P_{Lh} = -10,8 \log \frac{h}{2}$$

$$P_{Lh} = -10,8 \log \frac{2.5}{2}$$

$$P_{Lh} = -1,938(\text{dB}) \quad (\text{Ecuación 2.47})$$

Para el factor de corrección de la frecuencia se tiene la ecuación 2.42:

$$P_{Lf} = 6 \log \frac{f}{2000}$$

$$P_{Lf} = 6 \log f - 55,81 \quad (\text{Ecuación 2.48})$$

Finalmente reemplazamos todos estos parámetros en la ecuación 2.41 para obtener el modelo matemático final de propagación que representa las pérdidas que se producen en un sistema *WiMAX* de acuerdo al modelo de propagación SUI, es necesaria la transformación de dicha expresión, en la cual la frecuencia estará en GHz y la distancia en m.

$$P_{L\text{modificado}} = P_L + \Delta P_{Lf} + \Delta P_{Lh}$$

$$P_{L\text{modificado}} = -200,848 + 20 \log f + 50,73 \log d + 6 \log f - 55,81 - 1,938$$

$$P_{L\text{modificado}} = -258,596 + 26 \log(f 10^9) + 50,73 \log d$$

$$P_{L\text{modificado}} = -24,596 + 26 \log f + 50,73 \log d \quad (\text{Ecuación 2.49})$$

Esta expresión matemática que corresponde a la ecuación 2.49 se analizará junto con el modelo de propagación que se implantará a continuación. De esta manera se representa de manera óptima el desempeño de la propagación de la señal *WiMAX*.

2.4. Análisis del Modelo de propagación por pérdidas de lluvia

La lluvia es un fenómeno capaz de afectar a las comunicaciones inalámbricas debido a que actúa como cortina entre el transmisor y receptor. Para el caso específico de la Escuela Politécnica del Ejército este parámetro es importante ya que se estima que el clima en el Campus es variado con un amplio nivel de lluvia en la tarde en la época de invierno, razón por la cual es relevante estudiar una expresión en la cual intervenga la atenuación por lluvia.

Siempre que una señal electromagnética atraviesa una zona de lluvia, se generará un problema de atenuación, esto es debido a la absorción de la energía de las ondas electromagnéticas por parte de las gotas de agua, la cual puede reducir considerablemente la potencia de la señal.

Este fenómeno se vuelve significativo a frecuencias mayores de 6 GHz ya que las pérdidas en frecuencias superiores son genera mayor absorción de la energía por el agua. Como se trabaja a una frecuencia cercana a 6 GHz, es primordial describir cada expresión que puede afectar a la red ya que la misma trabaja en la banda de 5 GHz con alto nivel de pérdidas ya que se necesita más potencia para transmitir y receptor señales. Por esta razón es muy importante tener en cuenta estas pérdidas y la forma de calcularlas al momento de diseñar enlaces de banda ancha inalámbricos en zonas como el Campus de la ESPE, donde la lluvia es una variable constante a lo largo del año.

Entre los factores que afectan a la red inalámbrica a estas frecuencias están la propagación de las señales de microondas en ambientes turbios, como la absorción por gases y vapor de agua, la atenuación por lluvia, la atenuación por vegetación, entre otras, pero la más importante es la atenuación en entornos de lluvia ya que siguiendo las recomendaciones ITU-R presenta una pérdida significativa que representa un porcentaje de atenuación para los modelos de propagación estudiados.

En la recomendación *ITU-R P838-3* se describe la siguiente expresión considerando una tasa de distribución de lluvia R .

$$A_{Lluvia} = aR^b [dB/km] \quad (\text{Ecuación 2.50})$$

Donde:

A_{Lluvia} es la Atenuación por lluvias en dB/Km

R es la tasa de lluvia de la región en mm/h

a y b son unas constantes que dependen de la frecuencia y de la polarización de la onda electromagnética.

Algunos valores de a y b para distintas frecuencias y polarizaciones lineales (horizontal y vertical) se muestran en la *Rec. UIT-R 838*. De la tabla se deduce que la atenuación es ligeramente superior para polarización horizontal que para vertical. Esto se debe simplemente a la forma que adquieren las gotas de lluvia por el rozamiento durante la caída. [16]

También se analizan los términos a y b de la siguiente manera:

a_H, b_H : constantes para polarización horizontal.

a_V, b_V : constantes para polarización vertical.

En general a y b tienen las siguientes expresiones para la banda de 5 GHz que es en la que trabaja la Radio Base y el sistema inalámbrico:

$$a = 4,21 \times 10^{-5} f^{2,42} \quad (\text{Ecuación 2.51})$$

$$b = 1,41 f^{-0,0779} \quad (\text{Ecuación 2.52})$$

En la figura 2.9 se representan curvas de atenuación específica por lluvia en función de la frecuencia y para distintos valores de precipitación. Como puede observarse, la atenuación específica crece rápidamente para frecuencias por encima de 6 GHz.

Para una tasa de precipitación de $R = 50$ mm/h se obtienen valores de atenuación específica mayores de 10 dB/km para frecuencias superiores a 30 GHz. Por lo tanto, la lluvia es un problema serio en sistemas de radiocomunicaciones que operen a estas frecuencias.

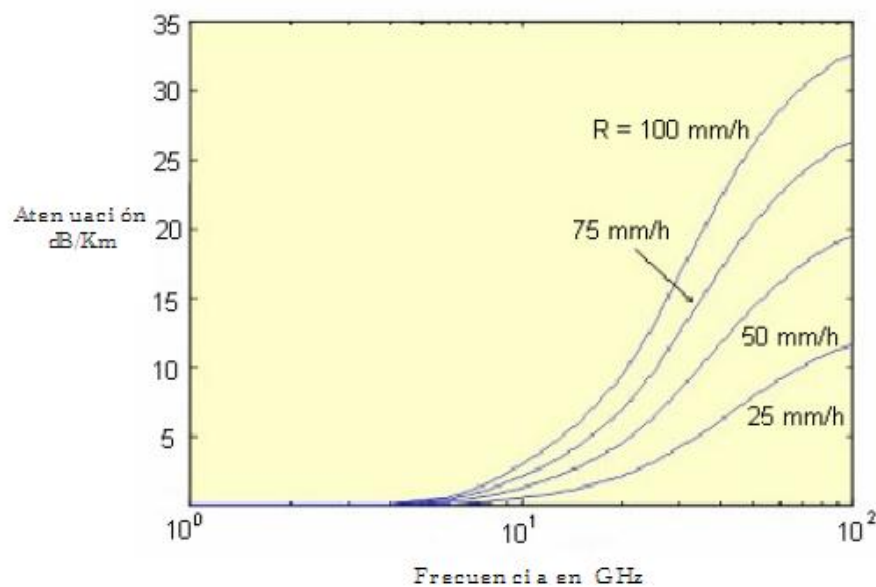


Figura 2.9. Atenuación específica para distintas intensidades de lluvia

Para el caso de la ciudad de Sangolquí se considera una intensidad de lluvia de 25mm/h, que es un valor alto en esta parte del Ecuador y además se presentan en raras ocasiones, estos valores son comunes en algunas ciudades del centro y Región Sierra del país en los entornos adyacentes a la Cordillera de los Andes.

Para identificar el valor de pérdida por lluvia, se reemplaza los valores de las expresiones de los coeficientes R , a y b ; también se toma en cuenta el valor de la frecuencia en GHz para analizar el valor de atenuación en el Campus. Se realiza este procedimiento en la ecuación 2.50.

Para $f=5,5$ GHz

$$\begin{aligned}
 A_{Lluvia} &= aR^b \text{ [dB/Km]} \\
 A_{Lluvia} &= 4,21 \times 10^{-5} f^{2,42} R^{1,41} f^{-0,0779} \\
 A_{Lluvia} &= 4,21 \times 10^{-5} 5,5^{2,42} 25^{1,415,5^{-0,0779}} \\
 A_{Lluvia} &= 2,606 \times 10^{-3} 25^{1,235} \\
 A_{Lluvia} &= 0,139 \text{ [dB/Km]} \quad \text{(Ecuación 2.53)}
 \end{aligned}$$

Este valor de atenuación es mínimo para el total de pérdidas que los modelos de propagación nos proporcionan, cabe mencionar que el valor de 0,139 es por cada Km recorrido, si hablamos del perímetro total del Campus tenemos un radio máximo de 1 Km por lo tanto la pérdida por lluvia en la ESPE es insignificante, ya que no sobrepasa este límite de distancia. Por tal razón no debemos tomar en cuenta este parámetro para el cálculo del nuevo modelo de propagación y para los mencionados en este capítulo.

Para enlaces terrestres con trayectorias mayores a 0,6 Km, la atenuación debido a la distancia entre antenas es menor de lo que muestra esta cifra cuando la lluvia afecta sólo a una parte de la trayectoria del enlace. Por lo tanto es necesario aplicar un factor de reducción para la distancia efectiva del enlace, el cual está dado como:

$$r = \frac{90}{90+4d} \quad \text{(Ecuación 2.54)}$$

Donde:

r es el factor de reducción.

d es la distancia real entre la Radio Base y el máximo límite de recepción en Km.

Por lo tanto la ecuación más exacta para el cálculo de la atenuación por lluvia es la expresión 2.55, a la cual reemplazamos los valores correspondientes para sacar un valor exacto de la atenuación:

$$A_{Lluvia} = aR^b dr \text{ [dB]} \quad (\text{Ecuación 2.55})$$

$$A_{Lluvia} = aR^b d \frac{90}{90 + 4d}$$

$$A_{Lluvia} = 0,139 \times 1 \frac{90}{90 + 4 \times 1}$$

$$A_{Lluvia} = 0,133 \text{ [dB]} \quad (\text{Ecuación 2.56})$$

d en esta expresión es 1 Km que es el límite del Campus y A_{Lluvia} pertenece al máximo valor que puede tomar la atenuación por lluvia, el cual no representa mayor importancia para las expresiones de los diferentes modelos matemáticos, por lo tanto la atenuación por lluvia no es un parámetro que este dentro de las características de propagación de la red y los cambios que en ella produzca son mínimos. Por esta razón no se tomará en cuenta este tipo de pérdida en el sistema inalámbrico del presente estudio.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales para la obtención y análisis de la medida de potencia

Como parte fundamental del estudio de propagación en este capítulo se analizará los equipos que intervienen al momento de realizar las medidas en el Campus Politécnico de la ESPE, además se identifican las herramientas necesarias para procesar toda la información adquirida con los dispositivos y finalmente obtener el modelo de propagación de potencia de la señal *WiMAX* a través de las herramientas de cálculo y simuladores.

Para la obtención de resultados eficientes hay que investigar una amplia gama de dispositivos de medición, herramientas de cálculo y simuladores con el objetivo principal de encontrar el equipo y el software con las características necesarias para el análisis de radiación de la antena.

Es necesario determinar cada uno de los dispositivos que intervienen en el análisis de la medida de potencia, a continuación se entrega un listado de los materiales que se utilizan para alcanzar el objetivo final en el presente estudio de propagación:

- Dispositivo de medición de potencia
- Dispositivo de ubicación geográfica y representación cartográfica
- Herramienta de cálculo estadístico
- Simulador de cobertura

- Programa geo-estadístico

3.2. Dispositivo para obtener la medida de potencia de la Red *WiMAX*

3.2.1. Selección del dispositivo de medición de potencia de la Red *WiMAX*

Como parte de este capítulo se analizará cual es el mejor equipo para realizar las medidas en el Campus Politécnico de la ESPE. Para la obtención de resultados eficientes hay que investigar una amplia gama de productos, con el objetivo principal de encontrar el dispositivo con las características necesarias para el análisis de radiación de la antena.

Para encontrar el dispositivo a utilizarse, hay que ver las características más importantes de la Red *WiMAX* entre estas están, que la banda espectral de los equipos cubra las frecuencias en la que la Red trabaja; además de identificar con precisión los niveles de potencia a corta y larga distancia en todo el espectro de la banda de 5Hz.

Las soluciones que se encontraron para la óptima medición de potencia, se pueden realizar con equipos fijos o móviles los cuales proporcionan servicios de ganancia o amplificación de la señal a receptor ya que la antena de la Radio Base irradia señales de potencia radioeléctrica muy débiles que solo son receptadas por los equipos y las antenas de la Estación Suscriptora.

Es muy importante describir los parámetros de la antena, para identificar la manera como irradia la misma, esta es omnidireccional, lo cual quiere decir que la propagación de la señal es punto a multipunto. Con esto cualquier equipo inalámbrico con una antena adecuada recepta la señal de la antena. De esta manera se optimiza el funcionamiento de los equipos los cuales deben adaptarse a las características de la Red.

A continuación se describirán los equipos probables para medir la radiación de la antena y finalmente obtener el dispositivo apropiado para el estudio de propagación de la Red.

R&S®ROMES

El sofisticado software de medición R&S®ROMES es aplicable a todos los estándares de telefonía móvil y es capaz de recopilar, combinar y analizar los datos de medida de los más variados sensores, por ejemplo, escáneres y teléfonos móviles de prueba, tarjetas de datos y receptores GPS.

Utilizando los sensores apropiados, como por ejemplo la tarjeta de datos *WiMAX* con función de rastreo, el software R&S®ROMES permite mostrar, almacenar y calcular parámetros de red. R&S®ROMES ofrece al usuario un panorama general sobre la capa física (PHY) con informaciones importantes tales como los valores del indicador de fuerza de la señal de recepción (RSSI), indicador del radio de interferencia y de ruido (CINR) y la potencia de transmisión. [17]

Con el software R&S®ROMES es posible elegir diferentes puntos dentro del trayecto de medición y visualizar todos los resultados con idéntica marca temporal. La visualización en modo de mapa permite por ejemplo identificar y seleccionar fácilmente zonas de medición de baja cobertura. El mapa presenta todos los parámetros medidos en diferentes capas. De este modo se puede comparar fácilmente la perspectiva parcial de la Red o de la tarjeta de datos con la perspectiva total del escáner, y sacar conclusiones con respecto a los problemas de usuario en la red.

El software funciona con receptores, ya sean estos celulares o computadoras portátiles que trabajen en las frecuencias de medida de la red a analizar o en su defecto escaners que permiten un funcionamiento mucho más rápido que las soluciones que emplean teléfonos móviles con función de medida. Al mismo tiempo, el escáner garantiza resultados precisos en

todo el ancho de banda de medida debido a que el preselector adaptativo elimina frecuencias fuera de este rango. [17]

Un teléfono móvil de prueba muy utilizado cuando el acceso a los datos de medición a través de la interfaz de rastreo es suficiente, en este caso se deberá tener un adaptador para una pre-amplificación o un celular que trabaje en las frecuencias de la banda de 5GHz.

Un teléfono móvil es útil para mediciones relacionadas con la conexión, como *throughput* de datos, calidad de conexión, *Soft-Handover* y *Hard-Handover*, calidad de audio y video, análisis de propagación de señal. [17]

En la Figura 3.1 se muestra el análisis de tarjetas de datos *WiMAX* con el software de medición R&S@ROMES. Arriba a la derecha, mensajes de direccionamiento IP. Abajo a la derecha, vista general de los parámetros *WiMAX*. Abajo a la izquierda, datos de escáner y cobertura de la red. La grabación de la ruta se utiliza para establecer la correlación de los valores de medición.

El software y el dispositivo es muy útil para el análisis requerido, pero tanto el alquiler como la compra del equipo completo es muy costoso. El tiempo de adquisición del equipo normalmente es de 1 mes ya que no se dispone el mismo en el país, y el costo neto subirá por los impuestos de ingreso.

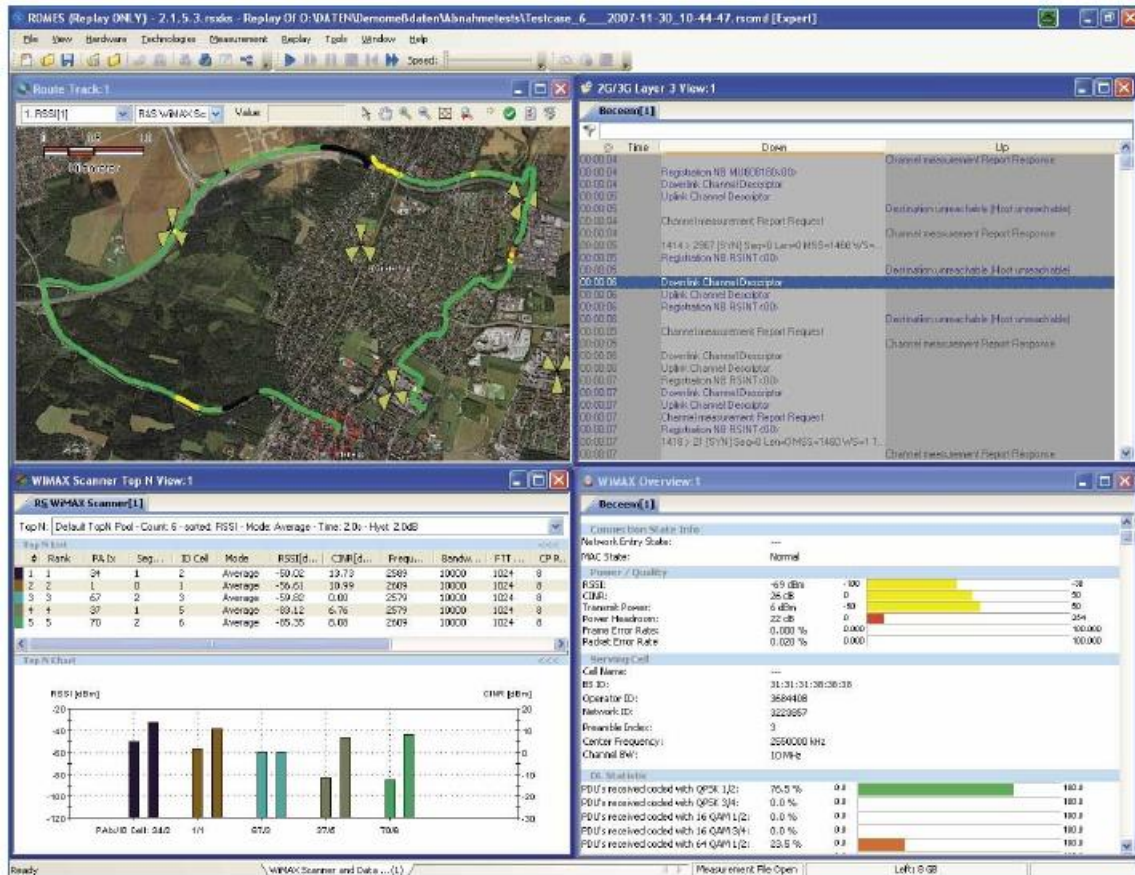


Figura 3.1. Software de medición R&S@ROMES

Analizador Universal de Redes de Radio R&S@TSMW

El software de medición R&S@ROMES y el Analizador de Redes de Radio R&S@TSMW forman un potente dúo para realizar mediciones de red *WiMAX*. La opción de escáner *WiMAX™* R&S@TSMW-K28 permite realizar un análisis detallado de lo que realmente está ocurriendo en el interfaz aire. En general los teléfonos móviles sólo reciben informaciones de entorno desde los canales de la estación base activa. El escáner no tiene esta limitación. Al contrario, detecta todas y cada una de las señales *WiMAX* disponibles con una sensibilidad que se halla muy por debajo del nivel de ruido. [18]

De este modo es posible verificar no sólo la información de entorno, sino también identificar señales de estaciones bases más alejadas que actúan como interferencia. El ancho

de banda de 20 MHz de ambos receptores del R&S®TSMW hace posible trabajar con todos los anchos de banda *WiMAX* más comunes.

En la Figura 3.2 se muestra la parte posterior del analizador R&S®TSMW.



Figura 3.2. R&S®TSMW

Sensibilidad, rango dinámico y velocidad de barrido son los parámetros claves de todo analizador de redes de radio-áreas en las cuales el R&S®TSMW ofrece unas prestaciones excepcionales. Un factor de ruido de magnitud de 7 dB en 5,5 GHz es garantía de alta sensibilidad, sin que esto signifique falta de inmunidad de interferencia. La preselección integrada atenúa suficientemente la interferencia fuera de la banda de recepción y sirve de protección frente a los productos de intermodulación indeseados. [18]

Para alcanzar una mayor velocidad de barrido, el R&S®TSMW dispone de dos componentes receptores. De este modo es posible barrer y demodular en diferentes frecuencias centrales. El corto tiempo de conmutación entre las distintas frecuencias centrales de menos de 5 m permite además la recepción casi paralela en cualquier cantidad de portadoras dentro del rango de frecuencia de 30 MHz a 6 GHz. El excelente ruido de fase de los receptores del R&S®TSMW ofrece, en combinación con el procesamiento sofisticado de señales, una dinámica de medida sin precedentes.

El costo es un inconveniente ya que es un equipo de nueva tecnología y con una amplia gama de aplicaciones, si se desea alquilar o comprar resultaría muy costoso.

Analizador de Espectros ANRITSU

La serie VNA (*Vector Network Analyzer*) Anritsu Master es la familia más avanzada de los equipos ultra-portátiles de mano en el mercado. Se caracterizan por tener un rendimiento sin precedentes y se lo utiliza para realizar medidas en RF, además de tener capacidades de microondas a precios módicos.

El dispositivo está diseñado para realizar corrección de vector en antenas y redes, con lo cual se puede identificar ruta de acceso, magnitud, fase y distancia a las mediciones de localización de fallas de 2 MHz a 6 GHz. [19]

VNA ofrece capacidad de precisión mucho más confiable que los procedimientos escalares, la energía de la pantalla de detección y seguimiento es útil para realizar medidas en largas trayectorias.

Este tipo de dispositivo es ideal para el diagnóstico de la antena y cable, a partir de 9 kHz a 7.1 GHz, en cualquier momento y en cualquier lugar. También apoyan las medidas de guía de onda para realizar el análisis necesario, además se añade capacidades de análisis de espectro de gran alcance ya que el instrumento proporciona todas las capacidades de RF esenciales en una plataforma de rendimiento verdaderamente portátil.

En la Figura 3.3 se puede observar el Equipo VNA Anritsu Master con los diferentes conectores y componentes.



Figura 3.3. Equipo VNA Anritsu Master

El VNA Master es una solución de prueba multifunción que es capaz de realizar todas las mediciones necesarias para la instalación y mantenimiento de redes inalámbricas, pero además posee la función de analizar antenas. El equipo es liviano, portátil, operado con baterías y diseñado específicamente para aplicaciones en el campo. Este dispositivo es fácil de usar y tiene una solución robusta con un buen rendimiento. Están destinadas a localizar e identificar con precisión el cable de alimentación de RF de línea y fallos de sistema de antena.

Ideal para aplicaciones aeroespaciales y de defensa, el VNA Master ofrece capacidades de medición de valor que puede sustituir a los instrumentos obsoletos y mejorar la movilidad del operador. De esta manera, los ingenieros de campo y técnicos usan una forma más rápida de instalar, implementar y mantener sistemas de RF en el campo. [20]

El VNA Master cubre fácilmente la mayor parte de las frecuencias *wireless* y *WiMAX*. El sello distintivo del equipo es su rendimiento en el ruido de fase, con opción de offset, por lo que mide fácilmente la mayoría de los osciladores locales y sintetizadores inalámbricos. Su pre-amplificador hace aumentar la ganancia de la señal que se necesita medir e, implica una rápida y precisa medida de los componentes *WiMAX*. [21]

Combina la funcionalidad de un analizador vectorial de antena y red (VNA) el mismo que consta de dos puertos uno de entrada y otro de salida, un analizador de espectros (*Spectrum Master*), analizador de interferencias, scanner, medidor de potencia, monitor de potencia, receptor de GPS incorporado, analizador de T1 en un solo instrumento compacto, voltímetro vectorial. Gracias a la multifuncionalidad podemos realizar un sin número de medidas para el análisis de redes y antenas.

En la figura 3.4 podemos observar los conectores para las diferentes funciones que tiene el dispositivo.

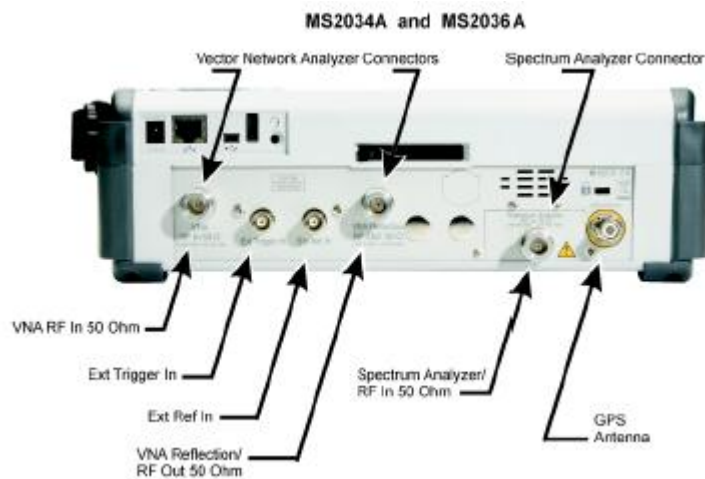


Figura 3.4. Conectores para las diferentes funciones del dispositivo

Ventajas del analizador en el estudio de propagación de la Red WiMAX

- Gran rapidez de medición al ser portátil.
- Alto rango dinámico y sensibilidad de medición.
- Operación independiente del tipo de red móvil.
- Capaz de detectar información de entorno con un preamplificador.
- Utilizable en múltiples aplicaciones y varias redes.
- Apto como referencia de medición.
- Inversión orientada al futuro, gracias a las opciones de software para su actualización

- No requiere recursos de red, es independiente de protocolos de los equipos.
- El equipo no representa un gasto extra en el proyecto ya que pertenece a un departamento del la ESPE, CIRAD.
- El dispositivo contiene antenas que trabajan tanto en las bandas licenciadas como no licenciadas para la Red *WiMAX* en este caso se utilizará una antena de 5.4 GHz con la cual se realizó pruebas previas y da un resultado óptimo.

Con la descripción de los equipos que se investigaron, se realiza la selección del dispositivo óptimo para realizar las medidas de potencia que irradia la Radio Base.

Se llega a la conclusión que el analizador VNA Master MS2036A es el equipo que mejor se acopla a las características necesarias para la medición de radiación. Se deduce esto por las características del equipo que son las básicas y adecuadas, como también que no representa costo alguno ya que el dispositivo pertenece a la Escuela Politécnica del Ejército.

3.2.2. Analizador de Espectros VNA Master MS2036A

Manejo y Calibración del Analizador de espectros

El analizador de espectros presenta un modo de multifunción, entre todos estos, vamos a trabajar con el modo VNA para comprobar la frecuencia a la que trabaja la antena RF para este mismo dispositivo y el modo Analizador de Espectros para medir la potencia en dBm que irradia la antena en cada punto del Campus de la Escuela Politécnica del Ejército.

A continuación se describirá todo lo necesario para cada uno de los modos a utilizarse en el presente proyecto.

VNA (*Vector Network Analyzer*)

Para obtener el VSWR de la antena se escoge un rango de frecuencias en el cual está trabajando adecuadamente la misma, en el caso de la Radio Base se realiza esta medida para ver la frecuencia óptima de todas en las que esta oscilando. También tenemos que obtener la medida de la antena del equipo con el que estamos trabajando para asegurar un óptimo funcionamiento en general del dispositivo.

Inicialmente se escoge un rango amplio de frecuencias para ver el mejor SWR, según este valor obtenido se reduce este rango hasta encontrar un límite inicial y un final de frecuencia. El valor óptimo es cuando SWR se acerca a 1dBm.

Cuando se escogió un rango de frecuencias colocamos en el VNA el límite inferior (*start f*) y el límite superior (*stop f*), para el proyecto los valores son de: 5.45 para el inferior y 5.55 para el superior, tal como vemos en la Figura 3.5.

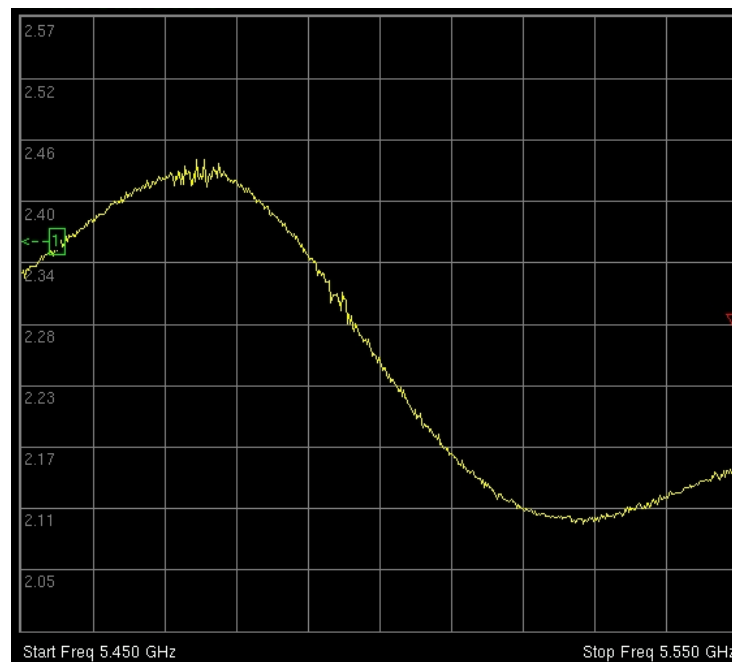


Figura 3.5. Límite inferior (*start f*) y el límite superior (*stop f*)

En este modo nos va a pedir en la pantalla que calibremos el equipo luego de haber seleccionado las frecuencias. Escogemos la opción calibrar utilizando las teclas *Shift + Calibrate*, y a continuación la tecla *Enter*. En este momento comienza el proceso de calibración que es el más importante para obtener medidas precisas.

A continuación se sigue el siguiente proceso utilizando los diferentes acopladores como se muestra en la figura 3.6. para realizar la calibración de frecuencia.

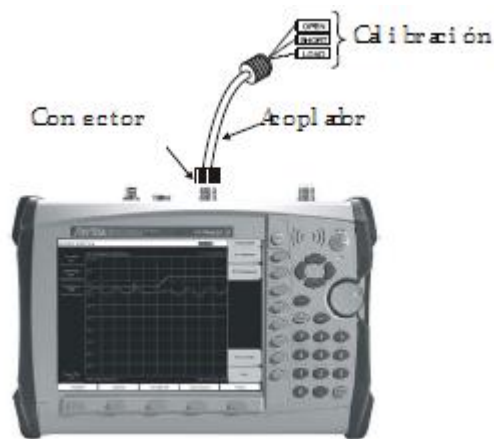


Figura 3.6. Acoplador para realizar la medición

En la pantalla se observa diferentes mensajes los cuales nos indican que acoplador incorporar, como se muestra a continuación:

1. Conectar el acoplador de circuito abierto (*Open*) al puerto de salida RF y a continuación la tecla *Enter*.
2. A continuación conectar el acoplador de circuito cerrado (*Short*) al puerto de salida RF y a continuación la tecla *Enter*.
3. Cuando solicite el dispositivo se cambia el acoplador por la carga (*Load*) al puerto de salida RF y a continuación la tecla *Enter*.
4. Verificar que la calibración fue realizada perfectamente, esto sucede cuando al final de conectar los diferentes acopladores ya no tenemos ningún mensaje de calibración. Comprobamos que el límite de frecuencias son las que vamos a utilizar.

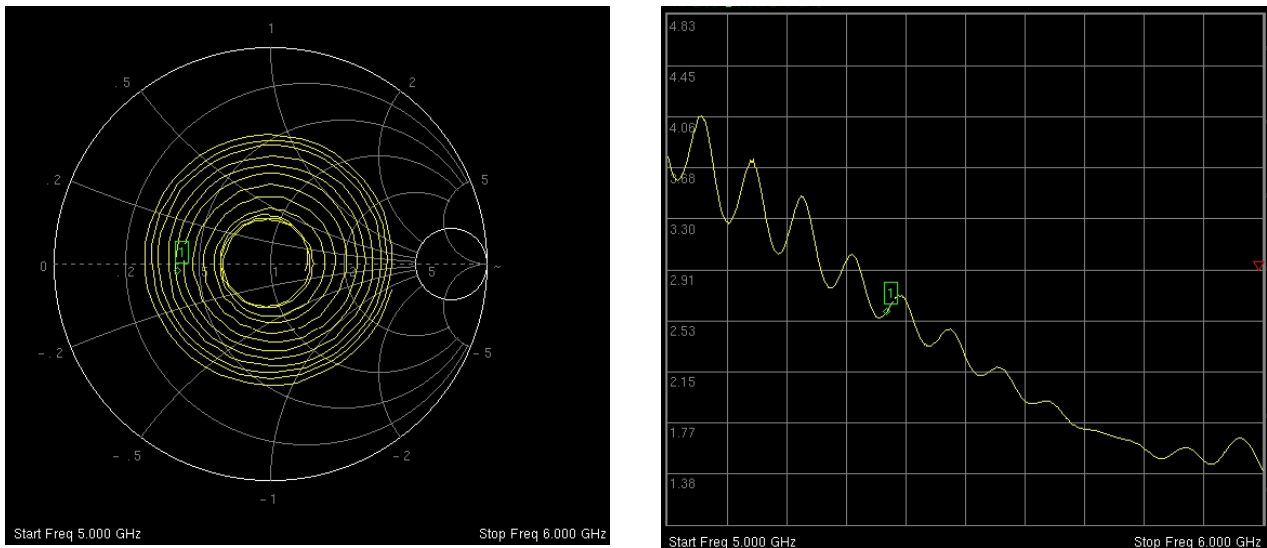
Luego de la calibración correcta conectamos las antenas, tanto la de la Radio Base como la del analizador en el puerto de salida RF para analizar el funcionamiento correcto.

La antena de la Radio Base nos da un VSWR óptimo en la frecuencia de 5.5 GHz, como ya se explicó antes se escoge el menor de todos los valores VSWR y se ubica la frecuencia de oscilación. La antena trabaja perfectamente en otras frecuencias cercanas a este valor por lo tanto para realizar las medidas de recepción de potencia se escoge un rango de frecuencia de 5.45 GHz a 5.55 GHz, en los cuales se ha obtenido valores bajos cercanos a 1dBm.

En la figura 3.7 se observa la Carta de Smith y el VSWR que se obtiene para la antena de la Radio Base la cual trabaja según las especificaciones del equipo en la banda de 5 GHz, para realizar el análisis de radiación de la antena lo más conveniente es trabajar en el rango de la misma ya que se puede encontrar otros canales de oscilación en toda esta banda, por esta razón el rango óptimo es de 5 GHz a 6 GHz.

En la Carta de Smith se observa el funcionamiento óptimo de la antena de la Radio Base en este rango de frecuencia ya que la gráfica del VSWR oscila en 1 dBm y su máximo valor está en los 4 dBm.

En la gráfica del VSWR se identifica que la antena trabaja de mejor manera desde la frecuencia de 5,4 GHz en adelante ya que desde este valor se obtiene un VSWR menor a 2,5 dBm. Por lo tanto la antena transmisora emite señales de potencia en este rango, los dispositivos extras a la antena forman parte de la Estación Base, estos circuitos hacen que la estación base trabaje en la frecuencia de 5,5 GHz, específicamente en el rango de 5,48 GHz a 5,52 GHz.



a. Carta de Smith

b.VSWR

Figura 3.7. Carta de Smith y el VSWR de la antena del dispositivo de medición

Es necesario investigar la antena del analizador de espectros. Para el presente proyecto es indispensable una antena con una ganancia mínima de 5 dBm para poder recibir la señal, ya que el analizador tiene un preamplificador de 20 dBm y gracias a este no es necesario un dispositivo externo de amplificación de bajo ruido.

Las antenas seleccionadas deben tener las características adecuadas para acoplarse de manera correcta a los parámetros del proyecto, las antenas que se seleccionó para acoplar al analizador son las siguientes:

- Antena Tipo Cornete
- Antena RF a 5 GHz
- Antena Log Periódica

En la tabla 3.1 se muestra los tres tipos de antenas con sus respectivas particularidades.

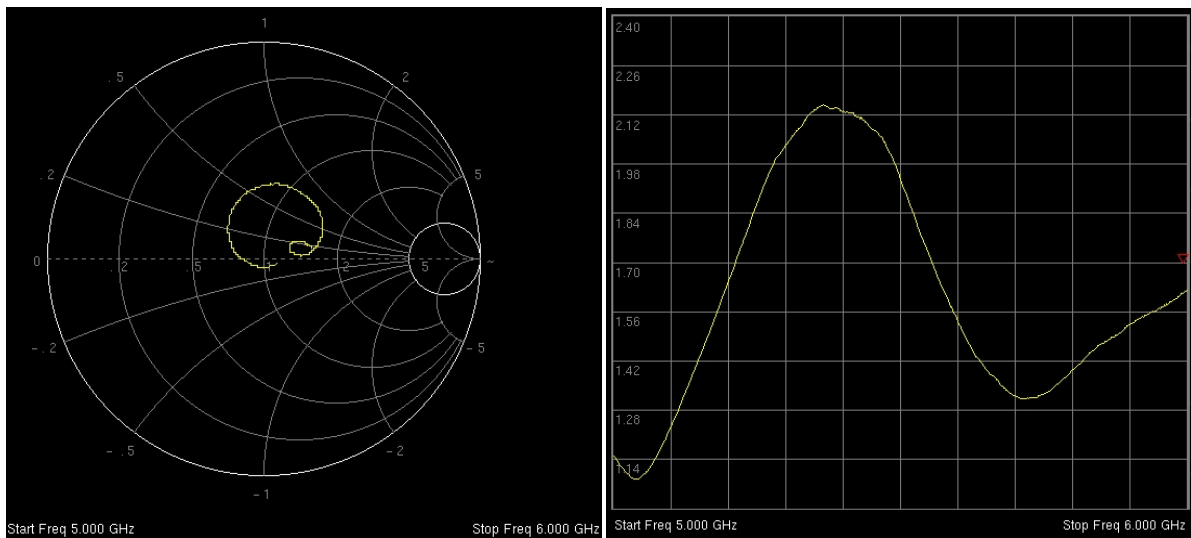
Tabla 3.1. Tipos de antenas con sus respectivas características

TIPO DE ANTENA	CARÁCTERÍSTICAS
Cornete	<ul style="list-style-type: none"> • Ganancia de 12dBm. • Trabaja el rango de 5KHz a 17.4GHz. • Peso moderado y de tamaño regular. • Conector SMA Macho. • Antena de Precisión.
Antena RF	<ul style="list-style-type: none"> • Ganancia de 7dBm. • Trabaja en la banda de 5GHz. • Portátil. • Conector VNA.
Log Periódica	<ul style="list-style-type: none"> • Ganancia de 9dBm. • Trabaja hasta 18GHz. • Para aumentar la ganancia es necesario colocar un plato parabólico. • Al trabajar con esta antena en conjunto no se tiene un dispositivo portátil. • Pesada y de gran tamaño. • Conector SMA.

La antena que se acopla de manera adecuada al proyecto, es la antena RF. La misma que tiene una ganancia que se ajusta de mejor forma a las especificaciones del estudio, trabaja en la banda de la antena de la Radio Base y además es portátil siendo esta característica muy importante para realizar la obtención de las medidas de potencia. Esto facilita la medición ya que se utilizará el analizador, el GPS y en lo posible una PC portátil, ya que los equipos son livianos y no es complicada su transportación es factible realizar las medidas de la señal.

Se analiza el VSWR de la antena, siguiendo el mismo procedimiento anteriormente descrito. Se obtiene que los valores óptimos están en las frecuencias de 5.05 GHz y 5.72 GHz, estos valores se dan cuando el VSWR es el menor en todo el rango de frecuencia. Se escoge estos dos valores de frecuencia ya que en estos puntos nos da un VSWR aproximadamente igual a 1 dBm.

En la figura 3.8 se observa la Carta de Smith y el VSWR que se obtiene para la antena del equipo de medición. En la Carta de Smith se pudo identificar que la antena está trabajando de manera óptima en la banda de 5 GHz ya que en la gráfica se ve que la circunferencia del VSWR está oscilando alrededor de 1 dBm, esto quiere decir que la antena del equipo de medición es la correcta para realizar las medidas con el analizador de espectros ya que trabaja de 5 GHz a 6GHz.



a. Carta de Smith

b. VSWR

Figura 3.8. Carta de Smith y el VSWR de la antena del dispositivo de medición

En grafica del VSWR se puede identificar que la antena trabaja perfectamente en toda la banda de 5 GHz ya que los valores del VSWR son menores a 2 dBm en todo este rango. De tal manera que si se trabaja en el rango de 5,45 GHz a 5,55 GHz con el equipo de medición la antena va a funcionar de manera eficiente ya que esta dentro de sus límites de frecuencia y se puede manejar en forma precisa la obtención de la medida de radiación de la antena.

Este es el análisis que se realiza con el VNA, el cual es útil para hallar los rangos y bandas de frecuencias en donde trabaja la antena, igualmente para detectar el VSWR de las mismas y verificar el funcionamiento correcto.

Analizador de Espectros

Últimamente hay un gran desarrollo de equipos electrónicos que incorporan tecnología de alta frecuencia y microondas conforme con los avances y dispersión de los equipos de telecomunicación. Como consecuencia, se necesitan analizadores de espectro de mano para analizar las señales en el dominio de la frecuencia. El analizador de espectros portátil utiliza el método de barrido de frecuencia y permite medir hasta decenas de GHz, solamente para la señal inalámbrica. [21]

Los analizadores de espectros de gran tamaño y consumo eran aptos para trabajar en laboratorio. Pero han tenido que reducir su tamaño y hacerse portátiles para trabajar en el campo debido a la reciente dispersión de los equipos de telecomunicaciones sin cables. Las necesidades del analizador de espectros de campo son compactos, ligeros, alimentación por baterías (bajo consumo) y económicos. El dispositivo cumple todas esas necesidades y dispone de funciones y características avanzadas para nuevos productos.

Anritsu es uno de los primeros fabricantes que maximiza el concepto de multifuncionalidad y logra fusionar en un solo dispositivo a varias opciones de medidas, entre ellas la más importante para analizar cobertura y radiación de la antena es el analizador de espectros que tiene un amplio rango de frecuencia el cual va desde 9 KHz hasta 7.1 GHz. El rango de amplitud en el dispositivo va desde 30dBm hasta -150dBm. Consta de un preamplificador que puede llegar aproximadamente a una ganancia de 25dB, y un atenuador que tiene un rango de 0dB a 65dB con incrementos de 5dB.

El amplio rango de frecuencia es lo último en métodos que aumentan la eficiencia y la comodidad del usuario, para proporcionar una banda adecuada en la cual se necesita realizar las mediciones de potencia. Es muy importante hablar de la sensibilidad del equipo ya que esta es la mínima o máxima potencia que va a recibir el dispositivo. En este caso como se va a trabajar con potencias relativamente bajas de la antena, se necesita una sensibilidad menor a los -100dB, la cual si es proporcionada por el equipo.

Si se necesita el análisis externo e inalámbrico para el desarrollo del proyecto es de gran utilidad el analizador de espectros Anritsu, ya que específicamente fue creado para entornos inalámbricos. En este caso es necesario incorporar al equipo una antena que trabaje en el rango de frecuencias de la Radio Base para realizar el estudio correspondiente. Como se especificó en la publicación antes descrita de la función VNA la antena que mejor se acopla al dispositivo es la RF que específicamente es diseñada para trabajar inalámbricamente y es fácil de transportar ya que se acopla perfectamente al equipo por medio de un conector.

Para el presente estudio el sistema de medición es necesario que trabaje en unidades de potencia en este caso dB, puede ser utilizado para medir otros parámetros y prestar otros servicios para aplicaciones inalámbricas.

Se debe seguir un proceso de calibración en el dispositivo, para el caso del analizador de espectros es solamente interna a nivel de software. En el procedimiento se establece todos los parámetros necesarios para receptar la señal en sus componentes espectrales.

Para colocar de mejor manera todas las escalas y parámetros se deben analizar las características necesarias de toda la Red, específicamente de la antena de la Radio Base, tomando en cuenta que algunas medidas requieren de un componente adicional, un amplificador de bajo ruido (*LNA*) o en este caso el uso de la característica adicional del dispositivo que es el preamplificador, para que puedan ser receptadas por el equipo las medidas que tienen una mayor distancia del punto a la Radio Base. De esta manera se identifica la información completa de la señal.

Los parámetros que se toman en cuenta para el dispositivo a nivel de frecuencia son: el rango de oscilación de frecuencia, en el cual se establece el límite inferior (*start freq*) y el límite superior (*stop freq*), para el proyecto los valores son de: 5.4 GHz para el inferior y 5.6 GHz para el superior. Existen otras medidas para calibrar la frecuencia, estas pueden ser el rango (*span*) para este caso es de 200 KHz y la frecuencia media que es 5.5 GHz.

Para calibrar la amplitud colocamos la información del valor de referencia (*reference level*), para el caso de nuestro análisis este dato es de -60 dBm con pasos o divisiones (*scale*) de 5 dBm. También introducimos la unidad que queremos medir para este estudio como se menciona antes es en dB. Para activar la opción de atenuador automático colocamos el dispositivo en *auto atten on*, se realiza este paso para que las señales que entran al equipo no se saturen a causa de acoplación con las características del equipo. Dentro de este parámetro de calibración podemos activar la opción de ganancia o pre amplificación para lo cual encendemos la opción *pre amp on*.

Una opción importante dentro del analizador es el rasgo o guía que va a tener la señal para lo cual se escoge la opción *shift + trace*, se despliega la pantalla y escogemos *trace A* y activamos la opción de máximo pico o trazo activando la opción *max trace*, de esta manera nos dibuja en la pantalla el máximo valor que recepta el equipo y se puede identificar el valor de potencia que se recepta en cada uno de los puntos donde se analice la señal.

Para escoger el máximo valor de la señal, activamos la opción de marca (*marker*) en esta opción podemos identificar el valor mínimo, máximo, la marca de la frecuencia central, se puede llevar la señal al valor de la marca, como también se puede señalar el siguiente valor máximo a la derecha o izquierda. Para el estudio es necesario activar la marca en el valor máximo, para lo cual escogemos la opción *peak search*, la cual nos lleva al valor ideal de la señal receptada.

Estas opciones son las más importantes para comenzar a medir la señal emitida por la Radio Base y realizar el Estudio de Propagación con todos los datos que se tomen con el dispositivo de análisis de espectros Anritsu.

3.3. Dispositivo de ubicación geográfica

Como parte fundamental dentro de las herramientas para obtener una buena medición de potencia es necesario ubicarnos de manera exacta en todos los puntos donde se requiera analizar la señal en el Campus Politécnico de la ESPE, por lo cual se describirá la instrumentación a utilizarse para el presente estudio. Para la obtención de resultados eficientes hay que investigar el uso de equipos, programas y productos, entre los que destacan el GPS, el programa ArcMap de ArcGIS y fotografías aéreas del área de estudio.

Las soluciones de equipos fijos o móviles que se identificaron para la óptima ubicación y representación espacial de los datos, que proporcionen servicios de exactitud o una aproximación al punto en un rango mínimo son, el programa ArcMap que será manejado por una PC y el equipo móvil será el GPS.

Es muy importante describir los parámetros de cada una de las herramientas a utilizarse, con esto se trabaja de manera óptima en la ubicación de los puntos. De esta manera se optimiza el funcionamiento de los equipos y finalmente con ayuda de cada uno de los dispositivos obtenemos un mejor análisis de propagación de la red.

3.3.1. GPS Trimble JUNO SC

Es un sistema global de navegación por satélite que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, una persona, un vehículo o una nave, con una precisión hasta de centímetros si se utiliza GPS diferencial, aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión.

Este dispositivo se lo adquirió por medio del Laboratorio de Geomática de la Carrera de Ciencias de la Tierra de la ESPE, el cual es de gran utilidad al tener una precisión de $\pm 1\text{m}$,

por medio de esta herramienta se pudo posicionar mediante coordenadas geográficas, con excelente precisión en todo el Campus y realizar el respectivo análisis.

El Juno™ SC de mano es un receptor GPS altamente productivo pero económico para la recolección de datos en el campo de trabajo y sistemas de información geográfica GIS móviles. Es una computadora de campo completamente integrada, más compacta y liviana de Trimble, la cual proporciona un posicionamiento GPS de 1 a 5 metros en tiempo real o tras el pos-procesamiento. [22]

Cuando se desea determinar la posición, el receptor localiza automáticamente como mínimo tres satélites de la red, de los que recibe unas señales indicando la posición y el reloj de cada uno de ellos. Con base en estas señales, el aparato sincroniza el reloj del GPS y calcula el retraso de las señales es decir, la distancia al satélite.

En la figura 2.15 se observa el GPS Juno SC cargado el programa ArcMap.



Figura 3.9. GPS Trimble Juno SC

Características del Equipo:

- De peso liviano y compacto
- Flujo de trabajo productivo tanto en el campo como en la oficina
- Con la familiaridad y conveniencia del software Windows Mobile 5.0
- Conectividad Bluetooth y WLAN.
- Trabaja con memorias SD
- Procesador Samsung de 300 MHz con 64 MB de RAM
- Almacenamiento de datos Flash de 128 MB, no volátil
- Cámara digital.
- Antena GPS/WAAS1

El receptor GPS trabajará con el programa ArcMap, como se especifica en las características del equipo el software del mismo es muy amigable por lo cual es como trabajar en una PC en la cual se ha cargado dicho programa ArcMap. Cuando se carga el programa con las imágenes de orientación respectivas se activa la opción GPS interna en el software. De esta manera y con la recepción automática de al menos 3 satélites el dispositivo permite la ubicación en cualquier punto del Campus.

3.3.2. ArcMap

ArcMap es un software de Sistema de Información Geográfica (GIS) creado para visualizar y ver asociaciones en la información geográfica y modelos a diferentes escalas. También permite la creación de mapas que llevan implícito mensajes o resultados de análisis geográficos. Puede ser utilizado para entender las relaciones existentes en información espacial geográfica, para la toma de decisiones. La presentación de resultados en forma profesional de mapas, gráficos, tablas, etc. hace que ArcMap puede ser utilizado para publicaciones de artículos y material científico. [23]

Para comenzar con la utilización del software es necesario instalar el mismo en la PC, la cual no requiere de características exclusivas para cargar el programa. Este únicamente nos va a servir para tener una mejor visualización con coordenadas geográficas del Campus Politécnico de la EPE. En el mapa se visualizará los puntos donde se analiza la señal, las edificaciones los límites del Campus, una grilla radiada, la cual tiene divisiones de 15m y 15° a todas estas se les llamará capas, las mismas que deberán estar cargadas siempre que se utilice el programa. Cada capa tiene su respectiva tabla, que nos va a ser útil sobre todo al momento de tomar datos de medida de la señal, específicamente con la capa de puntos medidos, en aquí estará la información de ubicación, entorno, nombre, potencia y frecuencia.

ArcMap ofrece vista geográfica de los datos el cual se visualiza en la PC como un entorno donde las capas geográficas se simbolizan, analiza y se agrupan en el mapa del Campus. Una interfaz en tabla de contenidos organiza y controla las propiedades de todas las capas en el marco de la vista. Todas estas características de visualización ayudan a tener un programa interactivo donde es fácil la ubicación de los puntos.

En la figura 3.10 se observa el programa ArcMap con las capas, el respectivo mapa, las tablas y todos los componentes del software.

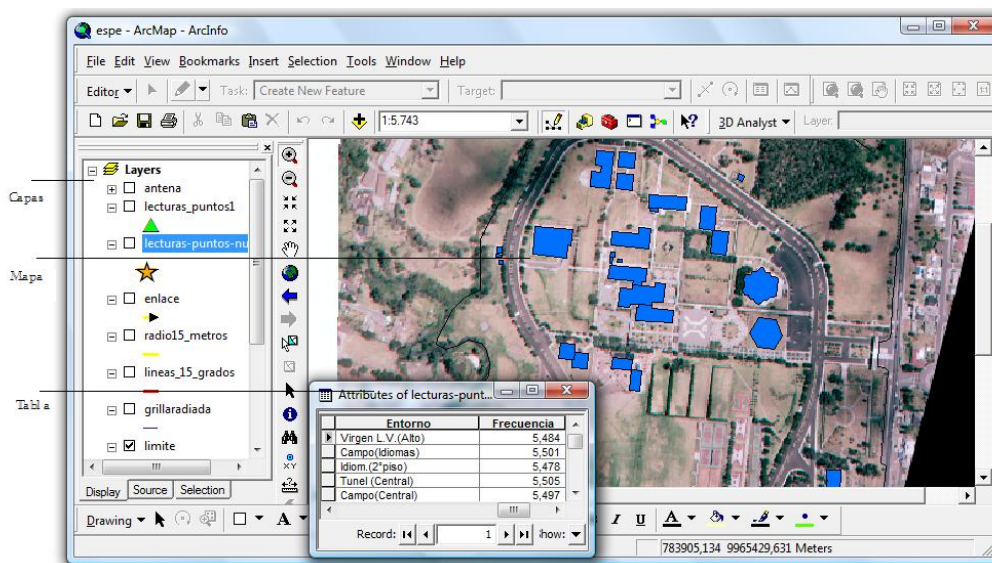


Figura 3.10. Programa ArcMap

3.4. Herramienta de cálculo estadístico (MATLAB)

MATLAB es una abreviatura de *MATrix LABoratory* que significa "*laboratorio de matrices*" el cual es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, puede ser utilizado en computación matemática, también es útil para el análisis y simulación, además para procesamiento de datos, visualización y representación de gráficos.

La empresa MathWorks ofrece a MATLAB como su principal producto para computación numérica, análisis y visualización de datos. También ofrece Simulink como un anexo a MATLAB y que interactúa con él en lenguaje de MATLAB y lenguaje de bajo nivel C++.

Simulink es usado para simulación y modelado no lineal avanzado. Se ofrecen además numerosas herramientas especiales en "*Toolboxes*" para resolver problemas de aplicaciones específicas, por ejemplo control, procesamiento de señales, redes neurales, entre otras. Estas herramientas son colecciones de rutinas escritas en MATLAB. [24]

Es una herramienta útil la cual sirve para realizar la simulación y predicción de niveles de potencia con respecto a la distancia y también es de gran ayuda para encontrar los rangos de cobertura de sistemas inalámbricos en ambientes como la ESPE.

3.4.1. Requerimientos del sistema para la instalación del programa

Se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones antes de comenzar a realizar las simulaciones respectivas, entre estas el operador deberá contar con las siguientes herramientas para utilizar el programa:

- Instalador del programa
- Licencia
- Fichero de permisos

La licencia y los ficheros de permisos son entregados por la empresa creadora del simulador, MathWorks Inc. Además la PC donde se instalará el programa debe contar con características propias del software. Es necesario determinar las particularidades mínimas con las que debe contar el computador personal que se utilice para instalar el software, el cual sirve para identificar el modelo matemático de propagación de la Universidad. A continuación se presentan dichas características que debe tener la computadora.

- Procesador Intel Pentium IV.
- Plataforma: x86 y x64 (32 Y 64 bits)
- 60 GB de disco duro.
- 512 MB RAM.
- Unidad CD-ROM.
- Tamaño ISO: 5.22 GB.
- MATLAB 2010a ha sido desarrollado para ser instalado en una plataforma de Windows (XP, Vista, Windows 7).

3.4.2. Herramienta *Curve Fitting*

Finalmente para encontrar el modelo la herramienta que nos interesa dentro del programa es *Curve Fitting*. Por medio de esta función se realiza el ajuste de la curva de todos los puntos del Campus y de esta manera se obtiene el modelo matemático que nos interesa en el estudio.

La herramienta para el ajuste de curvas proporciona interfaces gráficas de usuario y las funciones de línea de comandos para las curvas y las superficies de ajuste a los datos. *Curve Fitting* permite realizar análisis exploratorio de datos, procesamiento previo y posterior a los datos del análisis, comparar modelos, y eliminar los valores extremos. Puede llevar a cabo análisis de regresión utilizando la biblioteca de modelos lineales y no lineales, se puede especificar sus ecuaciones personalizadas. *Curve Fitting* también es compatible con técnicas no paramétricas de modelado, como interpolación y suavizado. [25]

3.5. Simulador de cobertura (SIRENET 3.4)

Las actividades de planeación, diseño, despliegue y mantenimiento de redes inalámbricas implican el uso de una serie de herramientas computacionales que han sido creadas con el objetivo de predecir el comportamiento de estas redes para tomar decisiones basadas en los resultados obtenidos de dicha aplicación. Uno de los aspectos más complejos relacionados con los sistemas inalámbricos es la manera como se modela el medio de propagación de las señales, el canal de radio y el ambiente en el cual se encuentra inmerso un sistema particular, para ello se utilizan simuladores. [26]

Para la simulación de los diferentes tipos de redes de comunicación, constituyen una excelente herramienta los simuladores para conocer y predecir el comportamiento de dichas redes. SIRENET (*Simulation of RadioElectric NETWORKS*) contiene un sistema de información geográfica que permite a través de cartografía digital representar simulaciones radioeléctricas,

con los algoritmos de cálculo más difundidos a nivel internacional en cuanto a comunicaciones inalámbricas.

Para la simulación de propagación de la Red actual de la Escuela Politécnica del Ejército se utiliza un programa actualizado para obtener resultados óptimos, la versión con la que se va a trabajar en el presente estudio es SIRENET 3.4.0.0. Esta versión presenta una interfaz gráfica amigable para el usuario, lo cual permite aprovechar al máximo sus capacidades, permitiendo inclusive la creación o modificación de parámetros predefinidos para un determinado estudio.

Una de las características más importantes de este software en su nueva presentación, es que se puede utilizar el programa en una plataforma de Windows Vista, su instalación resulta relativamente sencilla y los resultados obtenidos son fiables y fáciles de interpretar.

En SIRENET se puede crear o modificar un modelo de propagación de manera sencilla, ya que cuenta con una interfaz que le permite al programador tomar en cuenta todos los parámetros y detalles que debe tener un modelo para simular de manera eficaz el medio y los factores que inciden en la propagación de las señales.

Con el objetivo de realizar una mejor visualización del área de cobertura obtenida, la herramienta SIRENET tiene la opción de realizar exportación hacia Google Earth. De esta manera tenemos el barrido de la señal con los colores de cobertura y el mapa del Campus con todas las edificaciones, calles, bosque y todo el entorno que corresponde a la ESPE.

3.5.1. Consideraciones del Simulador SIRENET 3.4.0.0

SIRENET es un software de simulación desarrollado por la compañía española Intelia que cuenta con licencias para su utilización, el mismo que facilita la planificación y gestión de redes radio-eléctricas. Se la puede conocer también como una herramienta de planificación

que permite trabajar con todo tipo de servicios radioeléctricos y tecnológicos. Contiene un sistema de información geográfica la cual es muy sencilla e intuitiva de utilizar ya que consta de un conjunto de menús y ventanas que van guiando al usuario en los pasos que se deben seguir para la obtención de los resultados esperados.

Se debe tomar en cuenta ciertas consideraciones antes de comenzar a realizar las simulaciones respectivas, entre estas el operador deberá contar con las siguientes herramientas para utilizar el programa:

- Instalador del programa
- Llave hardware
- Fichero de permisos
- Modelo Digital del Terreno de la zona donde se desean realizar los cálculos (Ecuador).
- Mapa imagen sobre el que representar los resultados (al menos un mapa imagen).

Estos elementos son entregados por la empresa creadora del simulador, Intelia Consultores. Además la PC donde se instalará el programa debe contar con características propias del software. Es necesario determinar las particularidades mínimas con las que debe contar el computador personal que se utilice para la simulación de un determinado estudio, para el máximo aprovechamiento de las capacidades de la herramienta. A continuación se presentan dichas características tanto en equipos como en sistemas operativos:

- Procesador Intel Pentium IV.
- 60 GB de disco duro.
- 512 MB RAM.
- Unidad CD-ROM.
- Tarjeta de vídeo de 128 MB.
- Puerto USB para ingreso de llave.
- Plataforma de Windows Vista.

3.6. Programa geo-estadístico (ArcGIS)

Es una serie integrada de software de Sistemas de Información Geográfica que trabaja como un motor compilador de información geográfica alfanumérica (Bases de Datos) y gráfica (Mapas). El ámbito de acción de ArcGIS va desde el apoyo en la planificación de un negocio en particular, análisis de niveles de intensidad de diferentes parámetros, hasta el análisis espacial de enfermedades de una ciudad. Su arquitectura está elaborada de tal manera que sus herramientas entregan sistemas inteligentes de información geográfica. [27]

Con la herramienta ArcMap de GIS se puede construir los mapas dinámicos e inteligentes que permiten visualizar patrones, tendencias y singularidades en sus datos. Para el caso del presente análisis se establece una base de datos a partir de toda la información de potencia. La información es introducida de manera dinámica dentro de un mapa, y a través de cálculos isométricos, se puede observar los polígonos y las diferentes zonas de cobertura. ArcGIS incluye formas fáciles de levantar mapas, formatos predefinidos de mapas y una librería de elementos extensa, que permiten elaborar mapas de calidad rápidos y como el usuario desee. Los mapas terminados se pueden guardar, imprimir, exportar y ubicar en otros documentos o usos. También permite visualizar sus datos como cartas, informes, con volumen, con gráficos e imágenes; teniendo la posibilidad de editarlos expeditamente.

ArcGIS tiene la gran capacidad de realizar geo-procesos lo que permite desarrollar ajustes dinámicos de la información, adaptándola a los requerimientos de análisis del usuario, con esto se tiene la capacidad de construir procesos analíticos y flujos de trabajo.

3.6.1. Consideraciones del programa ArcGIS

Se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones antes de comenzar a realizar las simulaciones respectivas, entre estas el operador deberá contar con las siguientes herramientas para utilizar el programa:

- Instalador del programa
- Licencia
- Fichero de permisos

La licencia y los ficheros de permisos son facilitados por el Departamento de Ciencias de la Tierra de la ESPE. Es necesario determinar las particularidades mínimas con las que debe contar el computador personal que se utilice para instalar el software. Entre las más importantes es que sólo admite sistemas operativos Windows, es recomendable mínimo 1GB de RAM y requiere 2.4 GB de espacio en disco.

Se detalla una breve descripción para la instalación del programa ArcGIS en un computador de las características anteriores.

- Verificar que no existen conflictos con otra versión anterior de ArcGIS instalada, seleccionando la opción “*Uninstall Existing ArcGIS Software*” de la primera pantalla del instalador.
- Si existen versiones anteriores de ArcGIS debe proceder a su desinstalación.
- Instalar ArcGIS 9.3.
- Descargar e instalar la última versión de *Service Pack* que exista en la web de soporte de ESRI para la versión 9.3. de ArcGIS. [28]

3.7. Metodología para la medición de la señal de potencia

Para describir la manera y la metodología para la obtención de las medidas, hay que identificar la ubicación actual de la red y en el mapa del Campus de la ESPE seleccionar los puntos para realizar la medición, los mismos que se ubican en las zonas más importantes de la Universidad y en los diferentes ambientes, ya sea la calle, el bosque, las canchas, la residencia, los edificios, entre otros.

La metodología que se emplea para la medición de la potencia de la señal *WiMAX* utiliza como referencia importante la distancia con respecto a la radio base.

3.7.1. Ubicación Actual de la Red

Para la implementación de la estación base se realizó una reubicación de la antena. En un inicio en el estudio previo a la implementación de la red, el punto de posicionamiento de la estación base fue el Edificio Administrativo, siendo un punto estratégico por tener línea de vista con el resto de departamentos. Por motivos logísticos se decidió instalar en el edificio de Postgrados.

Esta nueva ubicación cuenta con línea de vista con todas las dependencias importantes del Campus Politécnico y es un punto estratégico ya que dispone de una altura relevante. Cabe mencionar que para la implementación de la Red y propagación de la señal *WIMAX*, no es necesario que exista línea de vista pero para que trabaje en las mejores condiciones es importante la selección de los mejores puntos para instalar las estaciones base y suscriptoras.

Para la instalación de las estaciones suscriptoras se realizó un estudio previo, donde en un inicio se instalarían en 15 edificaciones, en la situación actual se consideró 6 de éstas: DEEE, Biotecnología, Idiomas, Edificio Central, Edificio Administrativo y Residencia.

Para tener mayor línea de vista y una altura considerable en el caso de la estación base se requiere una infraestructura adicional para su ubicación como es el caso de torres o mástiles lo cual es una ventaja en cuanto a cobertura. En el caso de la Estación Base se utilizó una torre de 3 m, y en el caso de las Suscriptoras se utilizó torres de otras antenas ya colocadas en ese lugar para tener una altura adecuada.

En la figura 3.11 se puede observar la ubicación exacta de cada dependencia donde se colocaron las antenas de la estación base y las suscriptoras, además para un análisis más

profundo se añade la tabla 3.2 donde se tiene la información del gráfico y se añade las alturas de cada edificio, y la distancia respecto a la Radio Base.



Figura 3.11. Ubicación de la estación base y las suscriptoras

Tabla. 3.2. Distancia con respecto a la Radio Base, alturas y coordenadas de las dependencias de la ESPE

EDIFICIO	TIPO DE ESTACIÓN	DISTANCIA RESPECTO A LA RADIO BASE (m)	ALTURA DE LAS TERRAZAS (m)	COORDENADAS	
				Latitud	Longitud
Bloque D	Radio Base	0	10	0°18'46''S	78°26'43''O
DEEE	Suscriptora	85	5	0°18'45''S	78°26'45''O
Elect.-Biotecnología	Suscriptora	95	5	0°18'45''S	78°26'45''O
Idiomas	Suscriptora	95	6	0°18'47''S	78°26'40''O
Edificio Central	Suscriptora	125	10	0°18'51''S	78°26'43''O
Edificio Administrativo	Suscriptora	240	22	0°18'52''S	78°26'38''O
Residencia	Suscriptora	505	10	0°18'59''S	78°26'35''O

La distancia fue medida con el programa ArcMap luego de cargar el mapa de la ESPE, en la gráfica 3.11. Hay una ventana en la esquina izquierda superior, donde se encuentra el valor en metros de la estación base a la suscriptora ubicada en Electrónica.

Esta información ayudará a realizar un análisis completo de cobertura de la señal de la red *WiMAX* y la precisa ubicación de cada una de las estaciones que por el momento están funcionando en sus respectivas coordenadas.

3.7.2. Reconocimiento de los puntos de análisis en el Campus de la ESPE

Se selecciono un total de 153 puntos en todo el Campus, divididos estratégicamente, de tal manera que se cubre toda la Universidad a una distancia tolerable de un punto a otro. Se toma en cuenta las características de la zona donde está ubicado el punto así como el clima en el momento que se obtiene la medida.

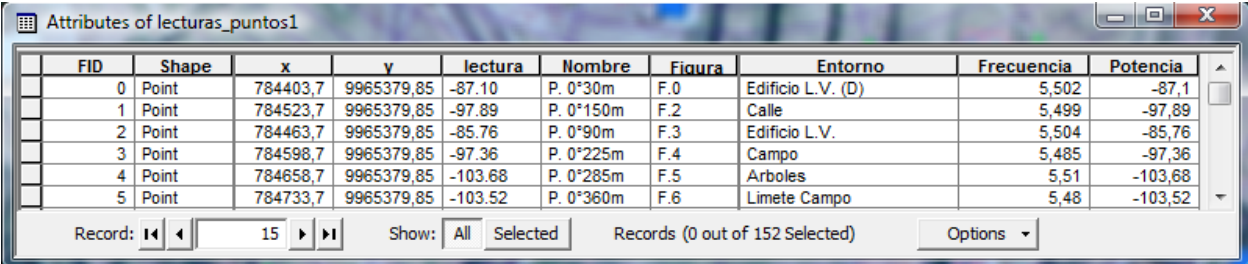
Las medidas en todo el Campus se realiza, previa ubicación de los puntos en un mapa en el que se debe cubrir un área de 360 grados. El mapa es una ortofoto facilitada por la ESPE, con formato de alta calidad radiométrica, multiespectral y espacial, la cual se carga en el ArcGIS y la lecturas de los puntos de potencia obtenidos en campo también se los ingresa al programa con su respectiva base datos para su posterior tratamiento y manipulación.

Dentro del mapa del Campus se trazo una grilla, con centro en la Radio Base. El eje es la antena y desde aquí se traza una línea horizontal en 0 grados y continua cada 15 grados, se obtiene un barrido total hasta llegar a 360 grados, por lo tanto tenemos una circunferencia con divisiones cada 15 grados.

De la misma manera empezando desde la Radio Base en el eje horizontal de 0 grados realizamos divisiones de 15 metros hasta llegar al límite de la ESPE, este proceso se realiza en todo el radio del Campus.

La intersección entre las líneas de cada 15 metros y el radio con divisiones cada 15 grados, es la referencia para colocar los puntos donde se va a realizar las medidas de potencia de la señal. Se ubican los puntos de tal forma que se cubra cierto perímetro pero se debe tener cuidado de no colocar puntos muy cerca uno del otro.

Cada punto tiene su base de datos, la cual es una tabla que se diseño dentro del programa ArcMap y contiene la coordenada, el número, el nombre o referencia, el entorno, la medida que se obtiene con el analizador, los cual se muestra en la figura 3.12.



FID	Shape	x	y	lectura	Nombre	Figura	Entorno	Frecuencia	Potencia
0	Point	784403,7	9965379,85	-87.10	P. 0°30m	F.0	Edificio L.V. (D)	5,502	-87,1
1	Point	784523,7	9965379,85	-97.89	P. 0°150m	F.2	Calle	5,499	-97,89
2	Point	784463,7	9965379,85	-85.76	P. 0°90m	F.3	Edificio L.V.	5,504	-85,76
3	Point	784598,7	9965379,85	-97.36	P. 0°225m	F.4	Campo	5,485	-97,36
4	Point	784658,7	9965379,85	-103.68	P. 0°285m	F.5	Arboles	5,51	-103,68
5	Point	784733,7	9965379,85	-103.52	P. 0°360m	F.6	Limete Campo	5,48	-103,52

Figura 3.12. Base de Datos de los puntos analizados

La simbología de los primeros 153 puntos se muestra en la figura 3.13 donde se observa el mapa de la ESPE con los puntos a ser analizados.

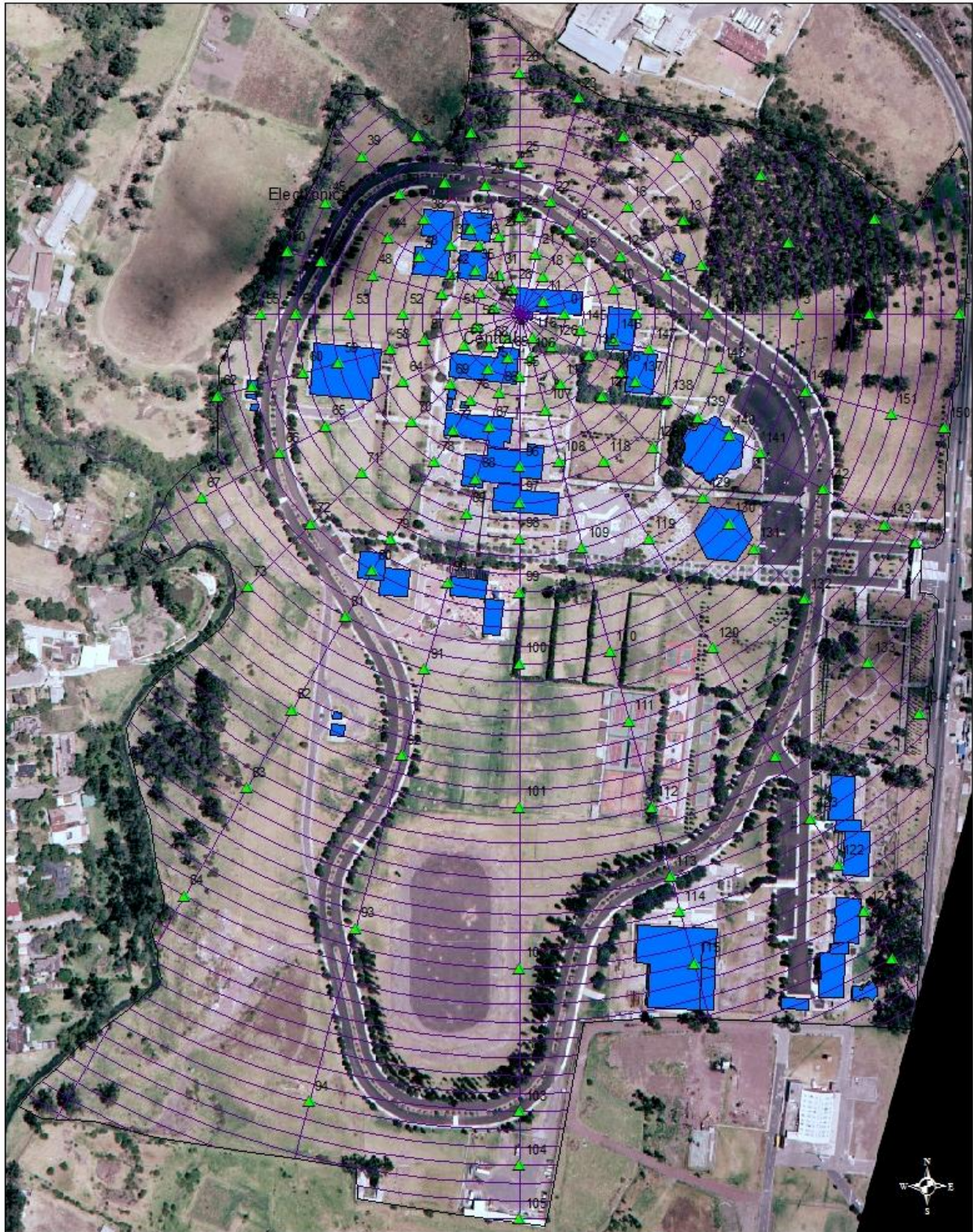


Figura 3.13. Mapa de la ESPE con los 153 puntos a ser analizados y su simbología

En los puntos mostrados se tomará las medidas de potencia y como se puede observar la selección de cada punto es la adecuada para cubrir con toda la cobertura que se requiere en la Escuela Politécnica del Ejército.

Se realizó varias visitas para identificar los 153 puntos en el campo y se analizó que hay puntos críticos los cuales no se tomaron en cuenta en el estudio previo. Estos nuevos puntos aparecieron en consecuencia a que ciertas zonas en la práctica no iban a ser consideradas, estas localidades eran esenciales para el análisis de cobertura ya que alguno de estos eran puntos lejanos pero sin embargo tenían línea de vista o en otro caso era campo abierto donde no había ningún punto de medición cerca y no se iba a tomar en cuenta esa área. Varios de estos casos fueron examinados y aquellos puntos que estrictamente necesiten un análisis se consideraron como una opción más de cuantificación de potencia.

Los nuevos puntos tienen otro tipo de simbología y en total son 31 lugares que se añaden al análisis, los cuales se consideraron como relevantes e importantes para el levantamiento de información de propagación, y se va a utilizar para realizar el modelo matemático propio del sistema para el Campus de la ESPE.

Estos puntos al igual que los antes descritos tienen una base de datos similar, a la cual se aumentó un parámetro para colocar alguna nota sobre el nuevo punto que se analiza. Estos puntos están compuestos de otro tipo de entorno, nombre o referencia, coordenada y medida que se obtiene con el analizador.

En la figura 3.14 se observa el mapa de la ESPE con todos los nuevos puntos y con una simbología diferente a los descritos anteriormente, se puede observar que se tiene diferentes ambientes y lugares que pueden ser críticos en el sentido de propagación de señal.

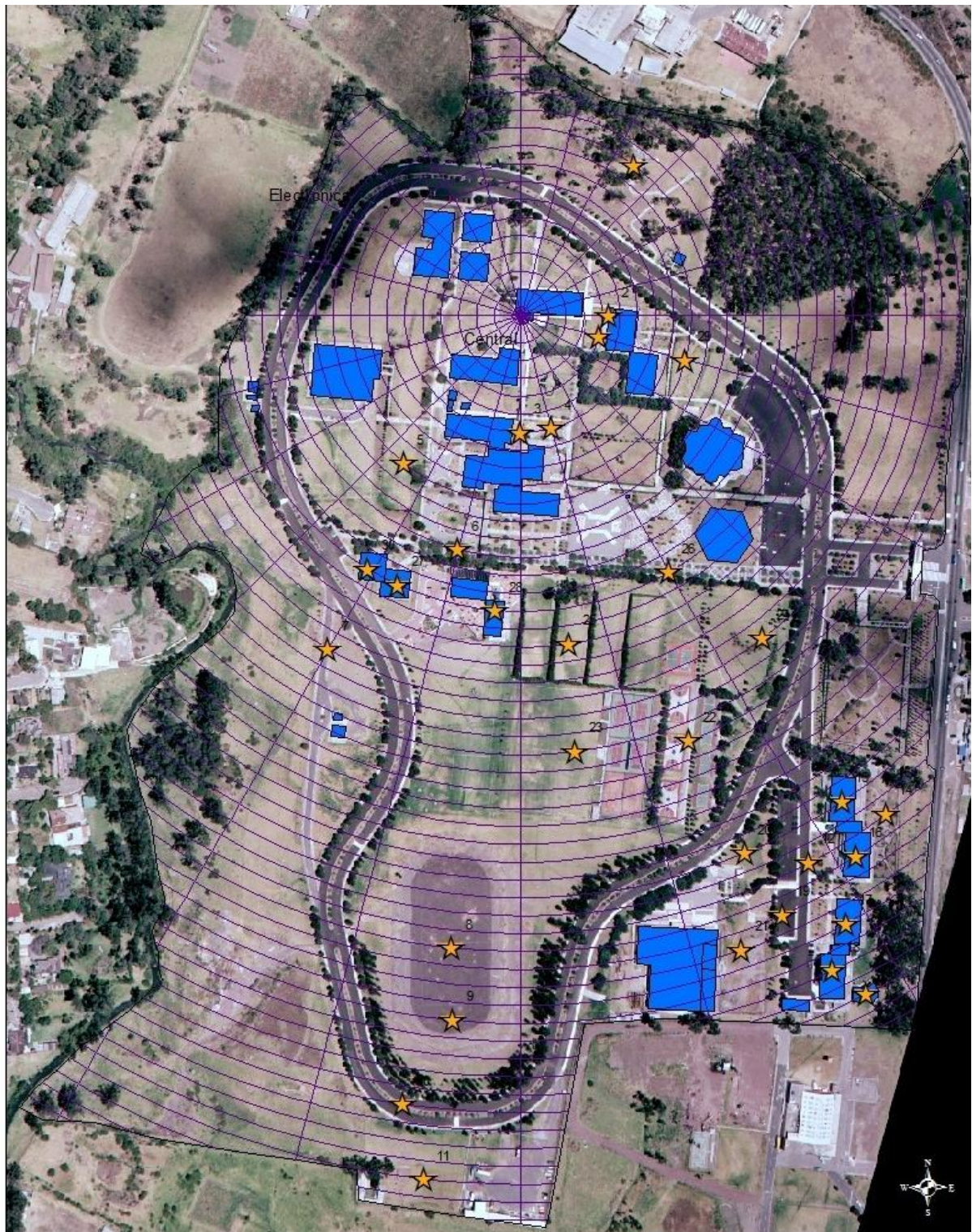


Figura 3.14. Mapa de la ESPE con todos los nuevos puntos y su simbología

En total entre los primeros y los nuevos puntos que se colocaron en el mapa de la ESPE para realizar las respectivas medidas son 184 lugares análisis más la medida que se deberá tomar en la antena de la radio base, entre todos ellos se tiene puntos críticos, insignificantes y otros importantes. Como dato importante se seleccionó la toma de las medidas en los edificios donde se supone que debe haber buena señal ya que la red funciona como transporte de información de la señal, y es necesario que llegue esta señal a la estación suscriptora que se puede ubicar en cualquiera de estas construcciones. Lo más importante para el presente estudio es la medición de la señal con el analizador de espectros luego de ubicar cada punto.

Una vez identificados en el mapa los puntos de medición, a continuación se encuentra el lugar específico con los dispositivos de ubicación geográfica, lo siguiente es hallar las medidas de propagación de la señal con el analizador de espectros y finalmente con estos datos se procede a analizar un nuevo modelo de propagación que será comparado con otros, propios a este tipo de red.

3.7.3. Técnicas para obtener la medida de la señal en cada punto

En esta sección se describe la manera cómo se utilizó cada equipo específicamente en el campo de trabajo, para medir la señal de la antena de la radio base y con los resultados obtenidos encontrar la expresión de propagación inalámbrica para los sistemas *WiMAX*. Los resultados *WiMAX* son los que se han obtenido en las posiciones de los 185 puntos.

Cabe recalcar que para medir en cada punto se utiliza un dispositivo de posicionamiento el cual va a ser el GPS, o un mapa interactivo en la PC-portátil. Estas dos herramientas cuentan con el programa ArcMap en el cual ya se instaló la ortofoto del Campus.

El estándar que se utiliza para la red inalámbrica en el proyecto tiene entornos con visibilidad directa en este caso, se direcciona al analizador de espectros en orientación con la

antena transmisora la cual es la Radio Base. Para entornos sin visibilidad directa se trabaja con el mismo dispositivo, al cual se le direcciona en posición de la antena de la estación base, en este caso no es de gran importancia que no exista línea de vista directa, ya que la señal puede ser receptada de otras maneras según las características de la red *WiMAX*, como se mencionó en el capítulo II correspondiente al fundamento teórico.

En la figura 3.15 se muestra la manera como se debe tomar la medida en el Campus Politécnico. Como se observa, existe un operador el cual busca el punto ya sea con el GPS o el mapa, a continuación se realiza el análisis del campo, donde se identifica si en la zona existe o no línea de vista directa, luego se estudia el entorno, el ambiente, el clima y demás parámetros que afecten a la medida, para realizar las respectivas observaciones a este punto.

Finalmente se toma la medida con el analizador de espectros, comprobando con anterioridad el buen funcionamiento del dispositivo y la calibración, el mismo se menciona en la parte de dispositivos de medición de potencia que se analizó anteriormente en este capítulo.

Hay que tomar en cuenta como se dijo en el punto anterior que el equipo esté trabajando bajo las condiciones de la radio base, esto quiere decir que estén todos los parámetros como frecuencia, ancho de banda, el preamplificador, la unidad de medida, y la amplitud en las condiciones ya indicadas en la parte de calibración del analizador de espectros.



Figura 3.15. Manera como se debe tomar la medida de la señal *WiMAX* en el Campus Politécnico

El analizador de espectros debe tener una dirección hacia la radio base en lo posible de 45 grados, el operador toma el dispositivo de medición con sus manos para alcanzar la altura de 2,5 metros aproximadamente que es al altura indicada para la recepción de señal, esta información se mencionó en el capítulo anterior y se lo utiliza para realizar el cálculo de los diferentes modelos matemáticos.

Al momento de tomar la medida, esperamos un tiempo prudente para seleccionar el pico más alto que se presente en el analizador de espectros y de esta manera tener un menor margen de error del modelo en estudio.

Por último se toma las medidas en todos los puntos antes descritos, se guarda la imagen obtenida en el analizador de espectros y en una tabla diseñada para los resultados finales colocamos el valor correspondiente de potencia y frecuencia de la señal para cada localidad del Campus Politécnico.

CAPÍTULO IV

ESCENARIOS DE PRUEBAS Y PRESENTACIÓN DE MEDICIONES

Luego de identificar la metodología para la obtención de la medida de potencia, el desarrollo de este capítulo se basa en la tabulación de medidas de los puntos estratégicos dentro del perímetro de la Escuela Politécnica del Ejército, con el análisis de las mismas se realiza el tratamiento del modelo matemático de la señal que se propaga a través del entorno con tecnología *WiMAX*. Este artículo se muestra como referencia a otros tipos de ambientes similares al Campus.

Se identificaron varios escenarios donde se realizaron las pruebas y mediciones, uno de estos es cuando la distancia en el Campus no presenta línea de vista, o en el otro caso existe la misma. También se estudia los entornos para una red *WiMAX* cuando existe en el enlace gran cantidad de obstáculos que provocan atenuación y por lo tanto dificultan la propagación de la señal. Otros escenarios son: campo abierto, canchas, calles, entre otros ambientes propios de la Universidad.

Por último para proporcionar un panorama general previo para la obtención del modelo, se debe mencionar que la medición depende principalmente de la potencia de radiación de las diferentes ganancias de la antena transmisora y el equipo de recepción del espectro, además depende directamente de las pérdidas de propagación que se involucran en la red.

4.1. Características de los escenarios de prueba

Las zonas donde se van a tomar las medidas tienen diferentes características, se dividen en calles, edificaciones, bosques, pequeñas colinas, espacios con línea de vista y en ausencia de esta, campo abierto, canchas, campo lejano. Se selecciono una gama amplia de terrenos, para hacer un análisis completo de todas las medidas que resulten, después de haber trabajado con el analizador en el Campus Politécnico de la ESPE.

En la figura 4.1 se puede observar los diferentes entornos donde se tomaron las medidas de propagación.

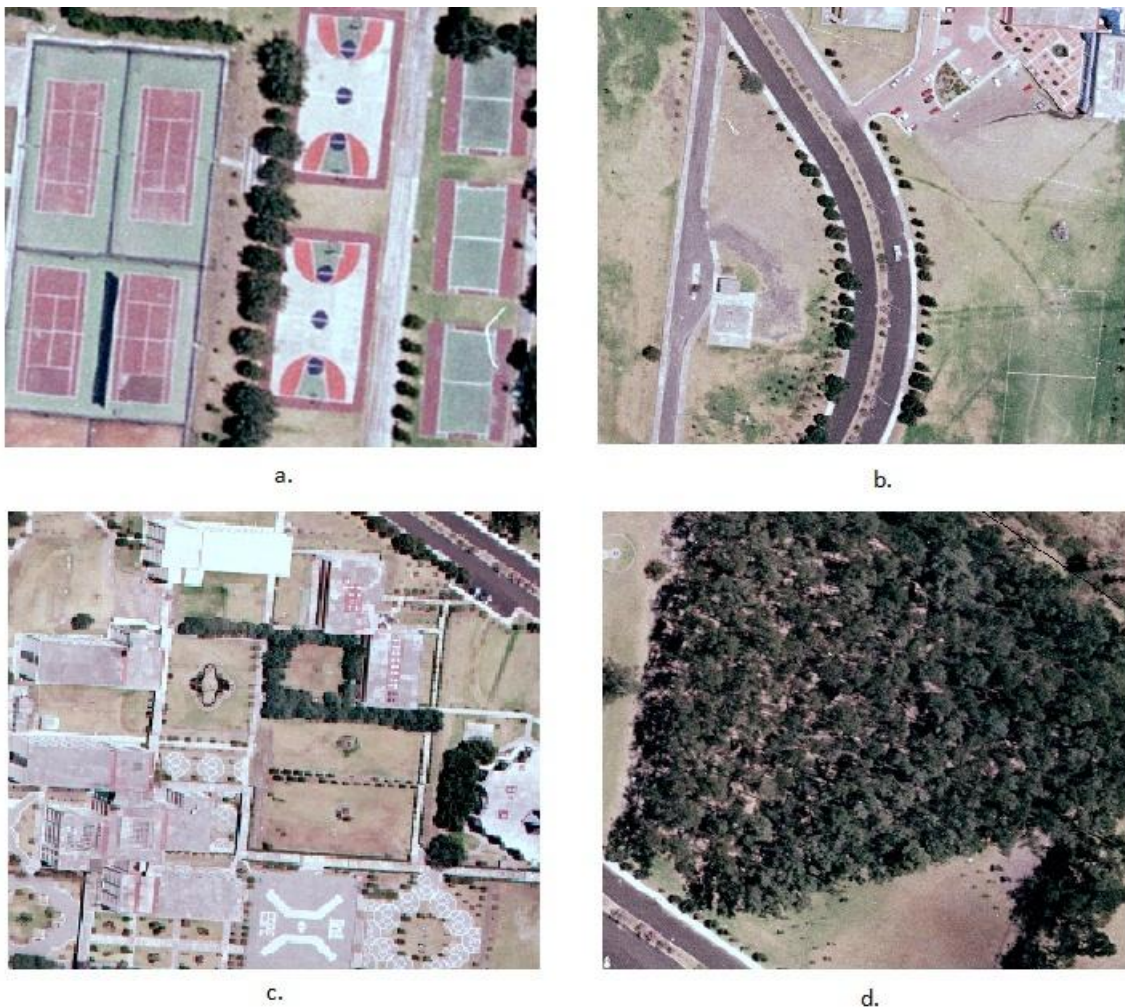


Figura 4.1. Zonas donde se realiza las medidas de propagación de la señal

En la figura 4.1.a. tenemos un campo abierto en el cual se aprovechó y se construyó canchas, en este terreno una de las características de propagación es que existe línea de vista con la radio base desde cualquier punto.

Dentro de la figura 4.1 Se identifica diferentes tipo de terrenos que tiene el Campus, entre ellos están, la figura b en el que se indica calles con un ancho de 12 m, esta se ubica en todo el perímetro de la ESPE por lo tanto hay que considerar esta característica que tiene la zona para hallar finalmente el modelo matemático

En la figura 4.1.c se muestra la alta densidad de edificios que tiene la Universidad en esta zona determinada, ésta característica se vuelve a repetir pero en menor proporción alrededor de todo el terreno. Estos pueden ser vistos como obstrucciones de manera que la señal puede llegar al equipo de medición por medio de reflexión, refracción, difracción y esparcimiento, estos parámetros se estudiaron en el capítulo III, los cuales se asocian y son importantes en el desarrollo de este estudio.

La figura 4.1.d se muestra un entorno con gran densidad de árboles, los cuales producen una alta cantidad de pérdidas, ya que son otro tipo de obstáculos, y en ciertas áreas no existe línea de vista, de esta manera se reduce la cobertura de la señal en estas zonas. Esto se reflejará en el modelo matemático de propagación de la Red.

Por otra parte todas las zonas de la ESPE son afectadas por un fenómeno natural, la lluvia y el clima son factores que afectan de cierta manera la propagación de la señal *WiMAX*, como se identificó en el anterior capítulo este valor de pérdidas es bajo, pero representa una cantidad de potencia que es necesaria para hallar un resultado óptimo en nuestro análisis.

Los cambios climáticos afectan las zonas de transmisión y recepción de la señal, en una región de lluvia las ondas se atenúan como consecuencia de la absorción de potencia que se produce en un medio dieléctrico con pérdidas como es el agua. Cuando el clima es moderado se analiza las medidas en situaciones ideales.

Todos estos factores como el clima, lluvia, bosque, canchas, obstrucciones y los demás entornos analizados producen un cambio en la recepción de la señal. Dependiendo del comportamiento de la red y de las características topográficas en general de la Universidad, la propagación de la señal en todo el Campus puede ser mayor o por lo contrario menor en algunas zonas donde se analice su comportamiento.

4.2. Recolección de información

Una vez que se identifica la técnica para obtener cada una de las medidas, se procede a recolectar el valor de propagación de la señal en cada uno de los 184 puntos y adicionalmente el valor de potencia bajo la radio base, siguiendo en cada localidad el procedimiento descrito en el capítulo III.

4.2.1. Cantidad de muestras para un menor margen error

Luego de tomar las 184 muestras en todo el Campus de la ESPE, se llega a la conclusión que una sola medida en estos puntos no es una buena alternativa para tener un error mínimo, ya que como se explico antes, las medidas de potencia pueden cambiar por cuestiones de clima, ambiente, entorno entre otros parámetros. Es por esta razón que se deben tomar nuevas medidas bajo estas condiciones y con estas realizar un promedio.

Cuando se produce este tipo de error, en el cual solo se toma una medida en cada punto se lo llama error accidental o aleatorio. Se pueden disminuir por tratamiento estadístico, realizando varias medidas para que las desviaciones, por encima y por debajo del valor que se supone deba ser el verdadero, se compensen.

Para acondicionamiento de un nuevo valor en cada punto, se deberá contar con el número de medidas necesarias en cada localidad, por lo tanto se investigó la cantidad de medidas que se deben analizar en base a un margen mínimo de error o varianza y a través de

un estudio de varias apreciaciones se determinó una solución final y gracias a esto se logra optimizar el modelo que se va a representar a través de estos valores.

En el proceso de medida siempre se perturba lo que vamos a evaluar ya sea por el dispositivo, por condiciones externas o por el operador y en consecuencia obtenemos un valor real alterado, para corregir la cuantificación de la señal se realiza el promedio de cierta cantidad de medidas de esta manera nos da un valor casi real. [29]

Para identificar la cantidad de medidas que se necesita tomar para obtener un error mínimo se sigue un procedimiento en el que se realiza tres medidas de potencia en el mismo punto. El primer punto que se escogió es bajo la Antena de la Radio Base, se opta por esta localidad ya que en este lugar se obtiene las mejores medidas de todo el sistema *WiMAX*. El otro punto que se denota es crítico y en esta localidad por lo contrario se tomó la menor medida, este lugar corresponde al coliseo que por motivos de distancia y el entorno geográfico no existe un buen enlace.

Con las tres medidas realizadas en cada punto se realiza el análisis respectivo. Como valor verdadero de la cantidad medida se toma la media aritmética de las tres. Se calcula dispersión (D) de esas medidas, para esto se resta la menor de ellas de la mayor y este es el valor de la dispersión. Luego se procede a calcular el % de dispersión, $\%D$, con la expresión 4.1. [30]

$$\%D = \frac{100 \times D}{\bar{X}} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

El cálculo de la media aritmética \bar{X} para tres medidas se representa de la siguiente manera:

$$\bar{X} = \frac{M1+M2+M3}{3} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Si el porcentaje de la dispersión ($\%D$) es menor que el 5% es suficiente realizar tres medidas. En caso contrario se realizan de 6 a 10, según las recomendaciones de cálculo estadístico en general. Hay que tomar en cuenta para situaciones extremas que si el porcentaje de la dispersión es mayor a 8 se deben realizar por el orden de 15 medidas. [29]

En la tabla 4.1 se muestra los dos puntos con las tres medidas para cada localidad, con estos datos que obtuvo con ayuda del analizador de espectros se procede a realizar el cálculo correspondiente, y se obtiene el valor de dispersión para cada localidad, al igual que la media aritmética y finalmente el valor de la expresión que se necesita para identificar el número necesario de medidas.

Tabla 4.1. Puntos con las tres medidas para cada localidad y el valor correspondiente para cada expresión

PUNTO	POSICIÓN	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	D	MEDIA	$\%D$
<i>P.114</i>	<i>P. 285°480m</i>	-104,18	-104,1	-103,89	-0,29	-104,057	0,279
<i>P.ANTENA</i>	<i>P. 0°0m</i>	-69,75	-68,13	-69,23	-1,62	-69,037	2,347

Finalmente se analiza los valores que se obtienen en la tabla 4.1. Se identifica que con una cantidad de tres medidas es suficiente para obtener un error menor al 5 % que es un porcentaje aceptable para el desarrollo de cualquier proyecto o estudio. Cabe recalcar que este cálculo se realizó en los puntos extremos de potencia, con esto se quiere decir que las demás localidades se adaptan a este análisis sin necesidad de realizar el cálculo respectivo de cada una de ellas.

Esta estimación del número de medidas no se debe tomar como algo exacto. Solo es un orden del número de medidas que se deberían tomar para obtener buenos rangos de confiabilidad en los datos recolectados. Si se requiere mayor precisión ya que se va a hallar un modelo matemático se puede tomar más medidas, para el presente estudio se evalúa en cada punto un total de 9 medidas, de esta manera se obtiene un menor margen de error ya que supera al estudio de dispersión antes mencionado y calculado en la tabla 4.1 con 3 valores de

potencia. El valor de 9 cuantificaciones es impuesto por el creador del modelo matemático para un mejor resultado.

En el procedimiento para medir los 9 valores en cada punto se trabaja con un equipo de operadores que realizan el análisis dentro de la Universidad en todos los puntos que conforma la ruta.

Las mediciones se realizaron en los 185 puntos de todo el Campus, a diferentes horas del día y en clima diferente para obtener un promedio de los valores de la muestra o del lugar donde se realizan las medidas. De tal manera que se puede encontrar un modelo que se generalice para cualquier clima, entorno, ambiente, entre otros parámetros que cambian la propagación de la señal.

4.3. Presentación y tabulación de los resultados

Se obtuvieron resultados de las medidas tomadas a lo largo de cada ruta seleccionada, en los cuales se establecieron 185 puntos en toda la Universidad. De la misma manera se presenta en esta parte la tabulación de las 9 medidas por cada punto, estos datos serán utilizados en el siguiente capítulo para identificar el modelo de propagación.

4.3.1. Tabulación de las medidas de potencia

Para presentar los datos obtenidos de la medición de la señal, se establecen ciertos identificadores que deben estar presentes al instante de realizar la tabla con todos los valores de potencia en los 185 puntos. Estos identificadores proporcionan información completa respecto a todos los puntos donde se realiza la medida de potencia.

La información que brindará la tabla es la siguiente, número del punto de medición que corresponde al número que se encuentra en el mapa diseñado en ArcMap e identifica la ubicación del mismo en el campo. Ejemplo P.92 que corresponde al punto 92.

La tabla proporciona el nombre del punto, en el cual se puede observar la coordenada en la que nos encontramos. Nos da información del recorrido radial, lo cual significa el grado en el que se ubica el punto. También se describe el recorrido en metros, esto quiere decir la distancia del punto a la Estación Base. Ejemplo P.0°30m, con lo cual se describe que el punto se encuentra en eje horizontal en 0° y se ha recorrido una distancia de 30 m desde la radio base al punto de recepción de potencia.

En la tabulación de las medidas también se encuentra el nombre de la figura y la medida que se graba en una base de datos del analizador de espectros. Ejemplo F.3 y M.3 que corresponden a la figura y medida del punto 3, esta información es proporcionada por el analizador y se encuentra en la memoria del mismo.

En la tabla se incluye el entorno en el cual se realiza la medida, esto es útil ya que se puede realizar el análisis del ambiente, entorno, si existe o no línea de vista y el clima. Se incluye esto en la tabla para realizar cualquier conclusión en el punto que se esté examinando. Ejemplo el entorno de P.68 corresponde a Campo L.V. Arboles, esto quiere decir que en esa localidad existe línea de vista y corresponde a un campo abierto con baja densidad de árboles.

La información más importante es la potencia del punto, en este identificador se incluye la recepción de potencia de la señal. Ejemplo en el punto P.38 la información de potencia es -80,73, este dato es proporcionado por el analizador de espectros y es el más relevante para realizar el modelo matemático. Se incluye también el identificador de la frecuencia que es un dato que se obtiene a través del dispositivo de medición Anritsu.

En la tabla 4.2 se muestran los 30 puntos más sobresalientes de todo el Campus con su respectiva información.

Tabla 4.2. Puntos más sobresalientes de todo el Campus con su respectiva información

PUNTO	NOMBRE	FIGURA JPG	MEDIDA	ENTORNO	POTENCIA DBm	FREC. GHz
<i>P.0</i>	<i>P. 0°30m</i>	F.0	M.0	Edificio L.V. (D)	-87,1	5,502
<i>P.10</i>	<i>P.15°300m</i>	F.10	M.10	Bosque	-102,76	5,477
<i>P.14</i>	<i>P.30°150m</i>	F.14	M.14	Campo-Bosque	-100,28	5,478
<i>P.18</i>	<i>P.45°180m</i>	F.18	M.18	Campo	-103,1	5,46
<i>P.19</i>	<i>P.60°30m</i>	F.19	M.19	Campo S.L.V. (D)	-94,13	5,506
<i>P.23</i>	<i>P.75°90m</i>	F.23	M.23	Calle	-97,35	5,524
<i>P.24</i>	<i>P.75°180m</i>	F.24	M.24	Bosque	-101,06	5,482
<i>P.29</i>	<i>P.105°15m</i>	F.29	M.29	Edificio S.L.V.(D)	-79,32	5,499
<i>P.30</i>	<i>P.105°105m</i>	F.30	M.30	Calle	-101,18	5,48
<i>P.33</i>	<i>P.120°75m</i>	F.33	M.33	Edificio L.V.(Bi)	-99,37	5,499
<i>P.36</i>	<i>P.135°45m</i>	F.36	M.36	Edificio L.V.(Ele)	-96,5	5,492
<i>P.43</i>	<i>P.150°60m</i>	F.43	M.43	Edificio S.L.V(EI)	-94,25	5,498
<i>P.50</i>	<i>P.165°165m</i>	F.50	M.50	Calle	-101,01	5,476
<i>P.52</i>	<i>P.180°45m</i>	F.52	M.52	Campo	-93,94	5,494
<i>P.57</i>	<i>P.195°30m</i>	F.57	M.57	Bloque S.L.V.(E)	-94,2	5,504
<i>P.62</i>	<i>P.195°225m</i>	F.62	M.62	Gasolinera	-103,1	5,521
<i>P.68</i>	<i>P.210°300m</i>	F.68	M.68	Campo L.V. Arboles	-98,93	5,485
<i>P.74</i>	<i>P.225°315m</i>	F.74	M.74	Campo	-101,16	5,535
<i>P.78</i>	<i>P.240°105m</i>	F.78	M.78	Edificio L.V. (B)	-95,02	5,502
<i>P.91</i>	<i>P.255°225m</i>	F.91	M.91	Edificio L.V.(Bar)	-102,43	5,478
<i>P.96</i>	<i>P.270°45m</i>	F.96	M.96	Tunel-Campo	-88,56	5,495
<i>P.102</i>	<i>P.270°405m</i>	F.102	M.102	Campo-Canchas	-98,1	5,585
<i>P.105</i>	<i>P.270°705m</i>	F.105	M.105	Transporte	-97,2	5,483
<i>P.110</i>	<i>P.285°195m</i>	F.110	M.110	Campo-Civico	100,21	5,502
<i>P.115</i>	<i>P.285°510m</i>	F.115	M.115	Campo-Coliseo	-103,41	5,525
<i>P.124</i>	<i>P.300°480m</i>	F.124	M.124	Edif. (Residencia1)	-103,24	5,483
<i>P.132</i>	<i>P.315°270m</i>	F.132	M.132	Edificio S.L.V.(Ad)	-103,79	5,507
<i>P.137</i>	<i>P.330°90m</i>	F.137	M.137	Edif. L.V. (Idiomas)	-102,11	5,508
<i>P.151</i>	<i>P.345°360m</i>	F.151	M.151	Bosque	-101,18	5,484

En la tabla 4.2 se muestra alguna diversidad respecto a los posibles entornos que se pueden presentar en el Campus, con esto se demuestra que la ESPE tiene una topografía variada. También se observa rangos de potencia entre los cuales fluctúan señales con alta ganancia de señal como es el caso de las edificaciones con línea de vista y los campos cercanos a la antena, por lo contrario se puede identificar que existen señales bajas, en bosques

donde hay mucha interferencia y atenuación debido a las pérdidas que producen los bosques frondosos con alta densidad de hojas.

La frecuencia no es de gran importancia ya que la radio base esta oscilando en la banda de 5 GHz, específicamente cerca a los 5,5 GHz el valor puede ser mayor o menor. Este valor no sirve para el modelo matemático ya que es un valor que se puede considerar como constante.

Existen entornos que a pesar de no haber línea de vista y en donde hay obstrucción completa ya sea por edificios, árboles entre otros la señal de potencia viaja por el medio de propagación y llega a la recepción por intermedio del dispositivo de medida. De esta manera en estas localidades se tiene buena recepción de señal, al igual que en campos abiertos como canchas, jardines, campo.

Por otro lado también en la tabla completa se puede observar que mientras más alto sea el punto donde se encuentre el dispositivo de recepción en comparación a la estación base, las pérdidas no son mayores por lo tanto se obtiene niveles altos de potencia en estos lugares.

En la toma de medidas en la calle la mayoría de estas tienen niveles altos, esto quiere decir que las pérdidas son insignificantes a lo largo de toda la ruta que tiene la calle principal de la Universidad, en ciertos trayectos la señal se atenúa por motivos de visibilidad desde ese punto con la Radio Base.

A mayor distancia la señal que envía la radio base se atenúa por motivos de pérdidas, esto se puede observar ya que la potencia en puntos lejanos a la antena es menor comparando con las medidas en los alrededores cerca de la estación base.

Las mediciones realizadas constituyen una base de datos importante para ser utilizada en diferentes estudios de propagación de la señal en zonas similares a la región de que se está

analizando. En esta base de datos que se tiene en las tablas, se realizó un análisis respecto a los entornos para que todo el perímetro que ocupa la ESPE sea estudiado, indicándose principalmente los perfiles del terreno, el campo y la visibilidad con la antena.

4.3.2. Tabulación de los puntos para el error mínimo

Se presenta en esta parte las 9 medidas que se tomaron por cada punto, se realiza el proceso de medición antes descrito para los 185 puntos que se eligieron como importantes para el proyecto de investigación.

En la tabla 4.3 que se muestra a continuación se incluye la información más importante de potencia de todos los puntos, para finalmente realizar un análisis completo de propagación. Con estos datos se encontrará el valor de pérdidas o atenuación en la red y a través de esta información se obtiene la expresión de propagación del sistema *WiMAX*.

Para presentar los datos obtenidos de las 9 medidas por cada punto, se establecen ciertos identificadores que deben estar presentes al momento de realizar la tabla. Estos identificadores proporcionan información detallada del punto que se está analizando. Primero cada posición tiene su nomenclatura al igual que la tabla anterior, de esta manera el lugar que corresponde al punto 58 es representado por P.58.

En la tabulación se encuentra el valor de las mediciones de potencia, el indicador que representa a las medidas está representado de la siguiente manera, en el caso de la primera toma de la energía de la señal es M.1, de la misma forma para la toma 3 se representa como M.3.

A continuación en la misma tabla se establece el valor de la media aritmética o valor promedio de la señal, esto se representa como MEDIA (\bar{X}). Para el cálculo de la media aritmética \bar{X} y la dispersión se toma la siguiente expresión:

$$\bar{X} = \frac{M1+M2+M3+M4+M5+M6+M7+M8+M9}{9} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

En la tabla se coloca el valor del porcentaje de dispersión que se halla a partir de la de la desviación respecto a la media que es la diferencia entre cada valor de la variable estadística y la media aritmética. Esta se representa de la siguiente manera.

$$D_i = M_i - \bar{X} \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Con este valor se calcula la desviación media que es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones respecto a la media. La ecuación 4.5 representa D_X , con este valor se calcula el porcentaje de desviación el cual es el que se incluye en la tabulación. [30]

$$D_X = \frac{\sum_{i=1}^n |M_i - \bar{X}|}{N} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Donde N es el número de medidas que se toma en el Campus y M es la medida correspondiente en el punto.

$\%D_X$ para el estudio tiene que ser menor al 5%. Este valor corresponde al error mínimo en las medidas de potencia que se necesita para obtener el modelo de propagación. El valor se expresa en la ecuación 4.1.

$$\%D = \frac{100 \times D}{\bar{X}}$$

En la tabla 4.3 se muestra solamente 20 de los 185 puntos que se necesita para analizar la propagación de la señal en el sistema. Además todos los puntos menores al 5% en dispersión están resaltados de color amarillo. Se muestra también el porcentaje más alto y el más bajo de todos los puntos.

Tabla 4.3. Medidas, valor de la media aritmética y porcentaje de dispersión de 20 de los 183 puntos

P	POTENCIA (-dBm)									MEDIA (-dBm)	DX %
	M.1 dBm	M.2 dBm	M.3 dBm	M.4 dBm	M.5 dBm	M.6 dBm	M.7 dBm	M.8 dBm	M.9 dBm		
P.0	87,1	94,96	90,51	82,46	71,69	75,1	84,87	84,62	78,15	83,27	6,86
P.1	99,09	96,14	93,01	89,15	88,9	89,16	98,9	98,96	98,99	94,7	4,36
P.2	97,89	90,99	94,38	88,9	89,11	89,66	99,88	99,1	98,9	94,31	4,38
P.3	85,76	99,01	98,79	89,55	88,87	88,66	102,2	101,98	101,92	95,19	6,52
P.4	97,36	86,77	85,62	88,67	89,09	88,57	92,33	93,3	92,66	90,49	3,37
P.5	103,68	103,06	103,56	102,11	103,46	102,92	102,73	103,1	102,9	103,06	0,34
P.6	103,52	96,7	91,96	88,68	88,44	89,06	103,6	104,1	103,36	96,6	6,50
P.7	104,1	95,41	99,3	104,58	104,36	103,26	101,33	100,88	102,1	101,7	2,16
P.8	103,54	99,79	99,87	88,82	89,15	89,2	105,89	106,3	105,65	98,69	6,51
P.9	103,45	89,68	91,8	89,1	89,15	88,76	97,2	96,9	97,3	93,7	4,75
P.10	102,76	99,36	99,56	88,85	88,86	89,27	104,1	103,9	103,08	97,75	5,97
P.11	99,83	94,28	93,98	90	88,87	88,76	99,6	98,4	99,87	94,84	4,29
P.12	88,93	81,87	81,08	82,56	82,89	84,76	96,94	90,87	99,19	87,68	6,39
P.13	100,5	92,29	96,36	85,8	88,25	88,76	97,71	97,3	95,82	93,64	4,62
P.14	100,28	98,69	99,2	91,12	91,12	91,12	97,4	97,2	98,1	96,03	3,41
P.15	102,96	99,08	95,92	88,69	89,29	88,84	104,3	105,2	104,3	97,62	6,31
P.16	98,26	87,89	92,13	88,33	89,23	85,03	98,33	98,49	97,52	92,8	5,12
P.17	101,78	83,88	93,84	89,56	91,12	89,59	97,54	96,9	97,2	93,49	4,71
P.18	103,1	99,07	98,23	88,76	89,08	89,47	96,43	98,58	98	95,64	4,55
P.19	94,13	93,35	94,62	85,07	91,25	91,25	95,5	87,56	86,36	91,01	3,43

Esta tabla es la más importante ya que contiene el valor de la media aritmética de todas las medidas realizadas en cada punto, y el porcentaje de dispersión. Esta información será analizada en el siguiente capítulo.

La tabla completa se encuentra en el Anexo 1.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE DATOS Y OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE PROPAGACIÓN

En este capítulo se presenta un análisis completo de los resultados obtenidos al realizar las mediciones reales de la señal *WiMAX* de potencia. El estudio para obtener las medidas en cada punto se lo realizó en el inciso anterior, en esta sección se identifica si estos valores están dentro de un margen mínimo de error y son los idóneos para utilizarlos como parte fundamental al momento de hallar el modelo matemático.

Luego de obtener un resultado positivo en el análisis respectivo de los valores, se procede a identificar el modelo matemático de propagación, utilizando la herramienta Curve Fitting del programa MATLAB. Para hallar el modelo se sigue un procedimiento estadístico y matemático, el cual se enuncia más adelante.

Se realiza el análisis de propagación de pérdidas y de recepción de potencia y se obtiene la expresión para cada una de ellas. Además es importante identificar tanto la ecuación de propagación en función de la distancia, como en función de la potencia y de esta manera alcanzar un resultado más completo en el estudio.

Es necesario considerar en la investigación la obtención de cobertura en SIRENET que se realizó en el capítulo I, pero en esta parte se debe presentar la simulación con el nuevo modelo matemático de propagación específicamente para el Campus de la Escuela Politécnica del Ejército y de esta manera hallar el barrido de potencia en el área de interés.

De igual forma en el estudio es preciso hallar las respectivas comparaciones del modelo matemático para la ESPE con las otras expresiones analizadas en el capítulo III y de esta manera obtener las conclusiones finales del proyecto.

Finalmente en este capítulo se realiza un mapa de propagación de la señal *WiMAX* con la huella de cobertura en todo el Campus, para lo cual se utiliza el programa ArcGIS. En el mapa se representará espacialmente, los 185 puntos establecidos en la ESPE y la potencia transmitida por la radio base.

La investigación es completa ya que se tomó en cuenta para el modelo matemático factores como transmisiones al aire libre y con obstáculos, también es importante recalcar que tenemos diferentes terrenos, condiciones ambientales, entre otros factores que cambian la ecuación de potencia. De tal manera la expresión de propagación predice las pérdidas por trayectoria, promedio de todos los factores antes mencionados.

5.1. Análisis de los resultados obtenidos

Las medidas que se obtienen en el campus universitario han sido realizadas con equipos de alta precisión y análisis de espectros en alta frecuencia. Dentro del campus se han escogido posiciones a una distancia equidistante a la estación base *WiMAX*. Los resultados obtenidos fueron mostrados en diferentes tablas. Las nueve primeras de estas tienen información de potencia, entornos, frecuencia, distancia con respecto a la radio base. La tabla que nos interesa para el análisis de los valores muestra un promedio de las nueve medidas en cada punto, esto quiere decir que es un resumen estadístico de potencia en los 185 lugares.

Además en la tabla 4.3 se establecen los valores de la media aritmética tanto de potencia como porcentaje de dispersión. Estos dos valores son los que se van a analizar dentro de este capítulo, ya que el desempeño del modelo de propagación de propagación se mide por veracidad de los resultados reales que se obtiene en el campo.

Primero se realiza un examen del promedio de las nueve medidas de potencia, donde se identificará las zonas con mayor y menor señal de energía transmitida por la antena principal. También se verificará las razones por las cuales se obtienen dichos datos en el promedio de las medidas.

En el escenario de la ESPE existe una distribución de edificios más o menos uniforme, en estos puntos la señal es fuerte, ya que las construcciones cuentan con alturas significantes. Por esta razón en las terrazas la potencia receptada por el analizador de espectros es favorable, estos puntos se deben aprovechar para instalar otras estaciones suscriptoras para que la red inalámbrica en el Campus funcione de forma optima. Es importante mencionar que las estaciones suscriptoras que fueron instaladas en ciertas edificaciones cuentan con una recepción de potencia inmejorable por tanto estos puntos son los que tienen mejor recepción de señal.

El escenario de la Universidad también tiene una gran densidad de bosques y arbustos alrededor del campo abierto y de todas las edificaciones, en la mayoría de estos puntos no se obtiene una señal tan eficiente. Una de las causas de este fenómeno es porque en estos puntos no existe línea de vista directa y por las características de propagación: difracción reflexión, refracción entre otras. Por esta razón la señal transmitida es distorsionada y no llega toda la potencia a causa de las pérdidas de propagación de la señal.

También en el Campus Politécnico existe otro tipo de obstáculos, que para este caso son los arboles que se ubican alrededor de la calle, también las edificaciones que se encuentran al extremo de la universidad. Sin embargo en la mayoría de estos puntos la señal es receptada, pero los valores de potencia son medianos. Los equipos pueden trabajar en condiciones óptimas en estos lugares

Los puntos lejanos que no tienen línea de vista directa como el coliseo, transportes y ciertos puntos en la residencia no tienen buena señal o también las señales son media-bajas. Esta condición en estos puntos se esperaba, de tal manera que las pérdidas en estos lugares son

relevantes pero en pocos sitios son más elevadas ya que las circunstancias son más extremas que en otros escenarios.

Existen puntos donde a pesar de no tener línea de vista, la señal es muy buena, esto es en la cercanía de la estación suscriptor donde existen una densidad de edificaciones considerable.

En la tabla 5.1 se presenta el número de puntos que existe en un rango de potencia determinado esta información sirve para saber cómo está trabajando la Red *WiMAX*, de esta manera se determina en que lugares existe mayor y menor pérdida de la señal.

Tabla 5.1. Número de puntos en un Rango de potencia determinado

RANGO DE POTENCIA	Nº PUNTOS EN ESTE RANGO	ESPECIFICACIÓN
$-94 \text{ dBm} \leq P < -75 \text{ dBm}$	82	Área donde se obtiene una excelente cobertura y los equipos pueden trabajar en condiciones favorables.
$-98 \text{ dBm} \leq P < -94 \text{ dBm}$	46	Se obtiene cobertura buena y favorable para que los equipos de recepción obtengan las señales transmitidas.
$-100,6 \text{ dBm} \leq P < -98 \text{ dBm}$	32	Área donde se obtiene una mediana cobertura sin embargo los equipos pueden trabajar en condiciones óptimas y receptan la señal transmitida por la Radio Base.
$-104 \text{ dBm} \leq P < -100,6 \text{ dBm}$	25	Puntos donde la señal es baja a pesar de tener cobertura y enlace con la estación transmisora, los equipos deben presentar potencias y sensibilidades muy grandes para recibir y procesar las señales transmitidas.

Con la red diseñada el nivel de potencia esta en el rango de -75 dBm a -104 dBm . Se tiene en todo el Campus 32 puntos que cuentan con una potencia de propagación de la señal media, 46 para una señal relativamente buena. También se observa 82 puntos que en su mayoría son las terrazas de las edificaciones que cuentan con una excelente recepción de señal. Esto nos informa que la red está trabajando en condiciones favorables para el buen funcionamiento de la misma.

Los 25 puntos restantes que a pesar de no tener una señal tan buena, son lugares que presentan condiciones extremas. Por esta razón los resultados son los que se observan en la

tabla 5.1. Sin embargo en estos puntos se puede receptor la señal transmitida, pero si se instalan equipos en estos lugares, estos dispositivos deben presentar potencias y sensibilidades muy grandes para recibir y procesar las señales transmitidas.

Los enlaces en el sistema *WIMAX*, deben cumplir con una calidad y disponibilidad que garantice el óptimo funcionamiento de la red y de esta manera entregar los servicios que se obtienen a través de la tecnología *WiMAX*, como: datos, voz y video comprimido. En este análisis se puede determinar que las medidas tomadas dan cierta calidad al sistema que fue instalado en la universidad ya que en la mayoría de los puntos se obtiene una señal de potencia alta, lo cual determina un óptimo funcionamiento de la red implementada.

En la tabla 5.2 se puede observar que el promedio de todas las dispersiones de los 185 puntos nos da un margen de error de $\pm 3,92\%$ que corresponde a un margen menor de las medidas obtenidas, el cual es menor al 5% , el cual es un valor óptimo. En general para cualquier investigación se considera que el porcentaje de dispersión sea menor al 5% , en la investigación se presenta un valor mejor al recomendado de tal forma que el resultado final será una ecuación más exacta.

Tabla 5.2. Dispersión en función de la cantidad de puntos

% DX	Medidas	% de Puntos en dicho rango
$1\% \leq \% \mathbf{DX} < 0\%$	3	1,62
$2\% \leq \% \mathbf{DX} < 1\%$	18	9,73
$3\% \leq \% \mathbf{DX} < 2\%$	34	18,38
$4\% \leq \% \mathbf{DX} < 3\%$	42	22,7
$5\% \leq \% \mathbf{DX} < 4\%$	46	24,87
$6\% \leq \% \mathbf{DX} < 5\%$	28	15,13
$7\% \leq \% \mathbf{DX} < 6\%$	9	4,87
$8\% \leq \% \mathbf{DX} < 7\%$	3	1,62
$9\% \leq \% \mathbf{DX} < 8\%$	1	0,54
$10\% \leq \% \mathbf{DX} < 9\%$	1	0,54
<i>Media aritmética del Porcentaje de Dispersión</i>		
3,92%		

En la tabla se puede analizar que el porcentaje de dispersión en todos los puntos no pasa del 10 %, siendo este valor solamente para un punto. El resto de datos se puede observar en la tabulación realizada, en la cual se hace una comparación entre el rango de porcentaje y la cantidad de puntos en dicho error, con este dato se realiza una regla de tres para identificar el porcentaje de puntos que se encuentran en un rango de error determinado. Por ejemplo, tenemos 34 medidas entre el 2 % y el 3 % de dispersión, este valor corresponde al 18,34 % de todos los puntos, lo cual representa una cantidad aceptable.

Se podría decir que el valor óptimo que nos proporciona la tabla se encuentra en un margen de error menor al 5 por ciento. Esto quiere decir, que tenemos 143 medidas menores al 5 % de dispersión, este valor corresponde al 77 % de todos los puntos, lo cual representa la mayoría de medidas. El cambio que se observa al aumentar el porcentaje de dispersión para 6, 7, 8, 9 y 10 es insignificante.

5.2. Cálculo de la Pérdidas de Potencia

Para determinar el nivel de pérdidas de potencia de la señal recibida con el dispositivo de medición para este caso el analizador de espectros en cualquiera de los escenarios anteriores debemos hacer un cálculo conocido como el presupuesto del enlace.

En este presupuesto o cálculo se debe tomar en consideración todas las ganancias y pérdidas que encontrará la señal al atravesar cada uno de los componentes del sistema y el ambiente en el Campus Politécnico. Aunque cada sistema de comunicación puede tener múltiples componentes de los cuales muchos pueden variar de un sistema a otro, podemos tomar en cuenta los principales y resumir el cálculo del enlace de comunicación tiene la siguiente fórmula:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{ATx} + G_{ARx} - L_{cables_{Tx}} - L_{cables_{Rx}} - L_{MEDIO} - A_{LLUVIA}$$

(Ecuación 5.1)

Donde:

P_{Rx} es la potencia de que puede receptor el equipo de medición, para el caso del estudio se utilizó el analizador de espectros Anritsu, este parámetro se mide en dBm.

P_{Tx} es la potencia del transmisor, para este caso la antena de la estación base en dBm.

G_{ATx} y G_{ARx} son las ganancias de la antena transmisora y receptora respectivamente, este valor nos da el fabricante de la misma y se mide en dBi.

$L_{cables_{Tx}}$ y $L_{cables_{Rx}}$ son las pérdidas de los cables y conectores de la antena transmisora y receptora respectivamente, se mide en dBm.

L_{MEDIO} es la pérdida de propagación en dB (que se calcula con cualquiera de los métodos discutidos anteriormente) y es el valor que nos interesa encontrar de toda esta expresión.

A_{LLUVIA} es la atenuación por lluvia mencionada en el capítulo 3 medido en dB.

Para encontrar la expresión de pérdidas de propagación del medio despejamos L_{MEDIO} de la ecuación 5.1. Esta formulación se utiliza para cada uno de los puntos donde se desea predecir la cobertura y pérdida del equipo transmisor. Se pueden graficar las ganancias y pérdidas que se asocian con el enlace de transmisión, para observar de una manera optima el fenómeno de propagación.

Cabe recalcar que las ganancias tanto de la antena transmisora y receptora corresponden al valor de 7 dBi, además es necesario añadir a esta información el valor de las pérdidas por guías de onda. Estas pérdidas corresponden a los cables y conectores los cuales son de -1 dBm y -0,25 dBm respectivamente. Para el análisis de los conectores este valor se duplica ya que se debe obtener la suma total del conector de la estación base y la antena. Estos valores son los recomendados para sistemas *WiMAX*, también hay que tomar en cuenta que para la construcción de la red se utilizó equipos de con bajas pérdidas.

El valor de pérdidas por cables para el equipo receptor no se toma en cuenta ya que para la conexión de la antena al analizador de espectros no se utiliza ningún cable, pero si se toma en cuenta el conector que tiene una pérdida de -0,25 dBm.

En la figura 5.1 se puede observar la potencia de recepción, con las ganancias de las antenas, las pérdidas de las guías de onda que corresponde a los cables y conectores, las pérdidas de propagación del medio y la potencia de transmisión de la antena de la radio base.

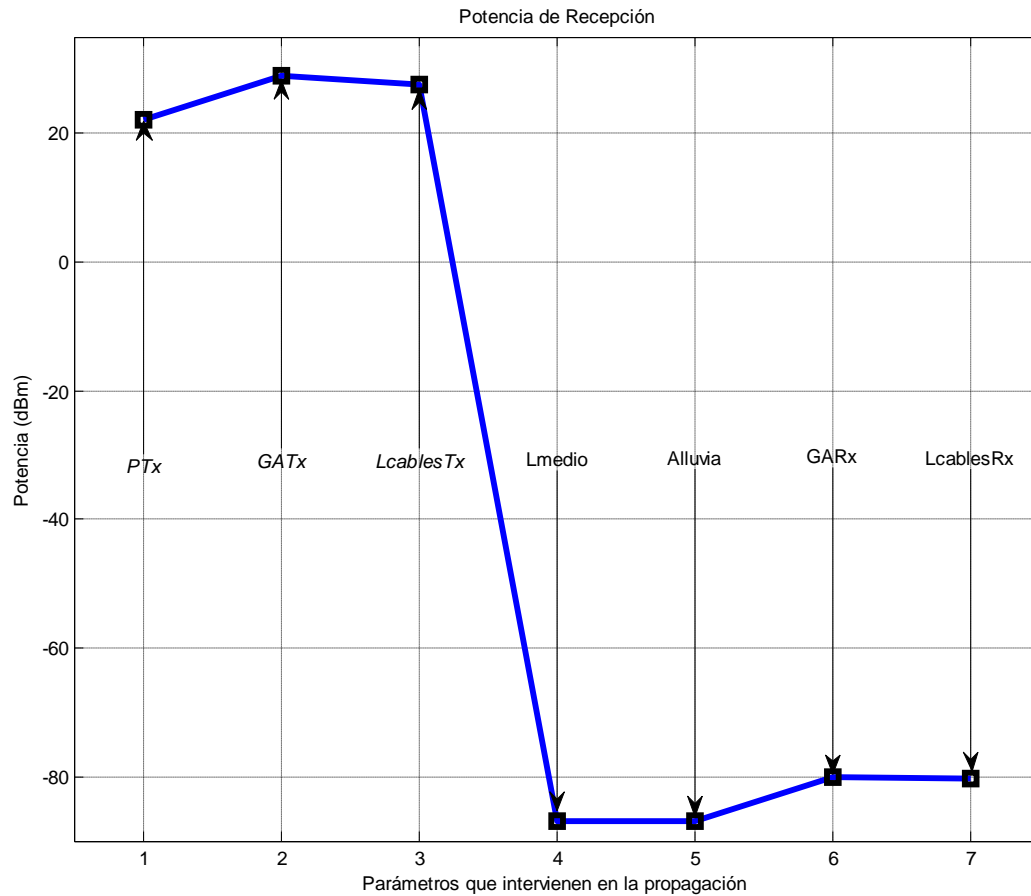


Figura 5.1. Potencia de Recepción

Con la información antes descrita y la ecuación 5.1 se procede a realizar el cálculo de la expresión por pérdidas de propagación de la potencia de la señal la cual tiene la siguiente expresión:

$$L_{MEDI0} = P_{Tx} + G_{ATx} + G_{ARx} - L_{cablesTx} - L_{cablesRx} - P_{Rx} - A_{LLUVIA}$$

(Ecuación 5.2)

En la tabla 5.3 se puede identificar la información completa de propagación que es necesaria para el presente estudio. Se han seleccionado 20 puntos de los 184 lugares, todos estos a diferentes alturas, para el cálculo del modelo se utiliza la tabla completa. En la tabulación se puede observar: el identificador del punto en el que se realiza el análisis, la media aritmética de potencia de recepción, la pérdida de propagación del medio y la distancia de la estación base al punto de recepción de la señal.

Tabla 5.3. Información de pérdida de potencia de propagación de la señal WiMAX

PUNTO	MEDIA (dBm)	L_{MEDIO} (dBm)	DISTANCIA (m)
<i>P.0</i>	-83,27	117,39	60
<i>P.39</i>	-83,62	117,73	750
<i>P.48</i>	-81,47	115,59	240
<i>P.51</i>	-99,81	133,92	30
<i>P.83</i>	-92,76	126,87	75
<i>P.90</i>	-93,65	127,76	90
<i>P.97</i>	-92,52	126,64	660
<i>P.107</i>	-89,22	123,34	105
<i>P.131</i>	-99,13	133,25	360
<i>P.133</i>	-98,19	132,31	210
<i>P.145</i>	-94,41	128,53	135
<i>P.150</i>	-91,39	125,50	150
<i>P.153</i>	-99,78	133,90	285
<i>P.164</i>	-100,44	134,56	420
<i>P.172</i>	-101,23	135,35	525
<i>P.173</i>	-101,26	135,38	315
<i>P.179</i>	-100,58	134,69	555

La tabla completa que se puede observar en el Anexo 1 es de gran ayuda para hallar el modelo matemático de propagación que es el siguiente punto a tratar en este capítulo y el análisis más importante dentro de esta investigación.

5.3. Creación de un Modelo matemático de propagación con los datos obtenidos

El modelo propuesto es un modelo estadístico con mediciones hechas en todo el Campus Universitario. La necesidad de este modelo surge de la peculiaridad del ambiente de propagación, el entorno de la ESPE y la infraestructura. Estas características son propias de la universidad, y provoca que el modelo sea exclusivo para un campo de este tipo, por lo tanto el modelo de propagación que se va a encontrar necesariamente se va a adaptar solo a situaciones como la Escuela Politécnica.

Para desarrollar el modelo era necesario realizar el primer paso en el cual se tomaron mediciones en el campo. Con la culminación del mismo y luego de realizar su respectivo análisis, el cual arrojó resultados óptimos se desarrolla la expresión. Esta ecuación se identificó con el manejo de una formulación en base a regresión logarítmica para describir la pérdida en esta zona.

Además en este análisis se desarrolla el modelo matemático tanto de pérdidas de potencia como de recepción de la señal. También para un análisis más completo se halla la distancia en función de la potencia de propagación con lo cual se obtiene un análisis de cobertura de la zona.

Finalmente se ajustó el modelo para reducir el error con respecto a las mediciones de campo. Una vez terminado el modelo se valida su efectividad comparándolo con los valores estimados usando los otros modelos de propagación ya estudiados.

5.3.1. Procedimiento para la obtención del modelo

El ajuste de curvas es un proceso mediante el cual, dado un conjunto de puntos tanto para distancia como para potencia, se determina una función matemática $f(x)$ de tal manera

que los valores obtenidos mediante la función se ajusten en cada punto con un error mínimo.[31]

Los modelos de propagación se han enfocado tradicionalmente en predecir la potencia promedio de la señal recibida, así como la variación de la potencia en la proximidad espacial de un lugar en particular. En esta sección se describirá el procedimiento para hallar el modelo matemático de propagación. Se analiza la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas del fenómeno realizadas sobre el terreno.

Modelo de propagación de pérdidas de la señal

Para analizar este modelo se parte la ecuación 5.2 ya mencionada en este capítulo, se trata de la expresión por pérdidas de propagación de potencia de la señal la cual tiene la siguiente expresión:

$$L_{MEDIO} = P_{Tx} + G_{ATx} + G_{ARx} - L_{cables_{Tx}} - L_{cables_{Rx}} - P_{Rx} - A_{LLUVIA}$$

Por medio de esta ecuación se obtiene todos los valores de pérdidas de los 184 puntos en todo el campus, la tabla 5.3 completa sirve de gran ayuda para encontrar el modelo necesario para el entorno de la ESPE. Ésta tabulación tiene información de todos los valores de potencia.

Utilizamos el programa MATLAB para predecir el modelo, dentro de este software la herramienta curve fitting. En esta sección se describe paso a paso hasta alcanzar el objetivo final que es la obtención del modelo matemático.

Abrimos MATLAB, en este espacio encontramos Workspace donde están todas las matrices y valores que se ingrese para resolver la expresión. Es necesario respaldar todo lo que se realiza en el software, por tal motivo se guarda este archivo como ESPE_MODEL. En la figura 5.2 se observa la manera como se guarda el archivo *Workspace*.

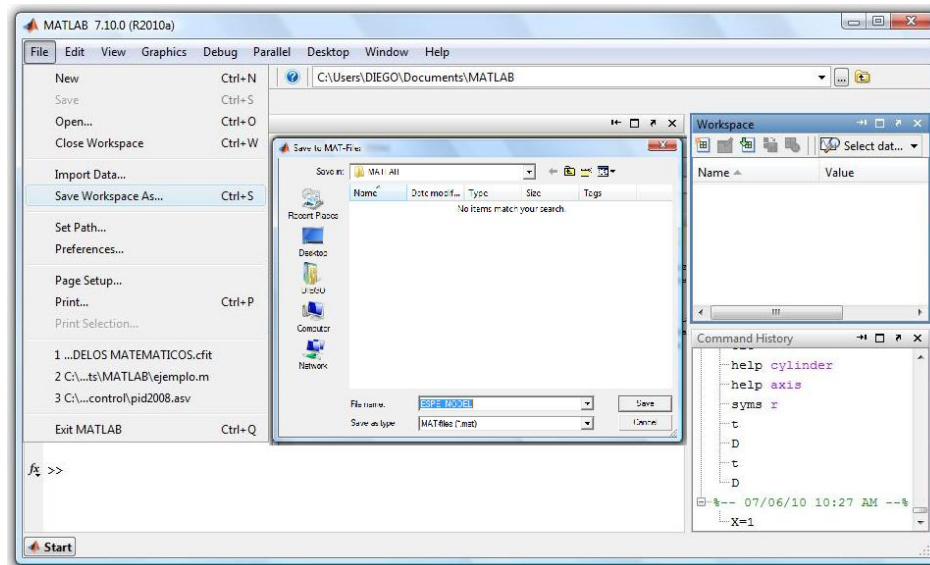



Figura 5.2. Guardar Workspace como ESPE_MODEL

Se crea las variables X y Y en *Workspace* con el icono  que crea una nueva variable. Para este caso X y Y corresponden a las matrices de la potencia de pérdidas y a la distancia respectivamente. Para el valor de X y Y importamos los datos de las tablas en los cuales se encuentra dicha información o utilizamos un método más sencillo, en el que copiamos los datos de potencia de pérdidas en EXCEL y pegamos en la matriz Y en *Workspace*. El mismo procedimiento se realiza para X , copiamos los 185 valores de distancia y pegamos en la matriz X o por su defecto importamos la tabla de EXCEL a *Workspace* correspondiente a la distancia. De esta manera podemos crear una tabla de distancia Vs pérdidas.

En la figura 5.3 se observa las matrices X y Y y sus datos.

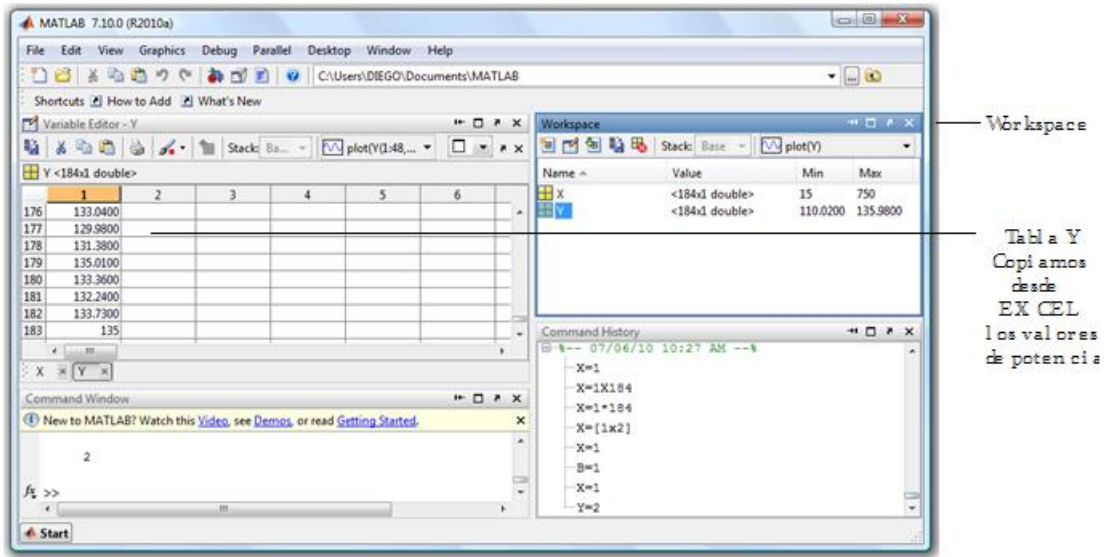


Figura 5.3. Matrices X y Y en Workspace con los valores de distancia y pérdidas

Luego de identificar las matrices X y Y, se procede a realizar el cálculo del modelo matemático utilizando la herramienta *curve fitting*. En la figura 5.4 se observa la manera como se abre la herramienta. Primero en la opción *Start* se selecciona *Toolboxes* luego *Curve Fitting* y finalmente *Curve Fitting Tool (cftool)* de esta manera se abre la herramienta de interés. Luego de realizar este proceso, lo primero que se hace es guardar el archivo, para tener un respaldo con el nombre ESPE_MODEL.cfit en la opción *Save Session*.

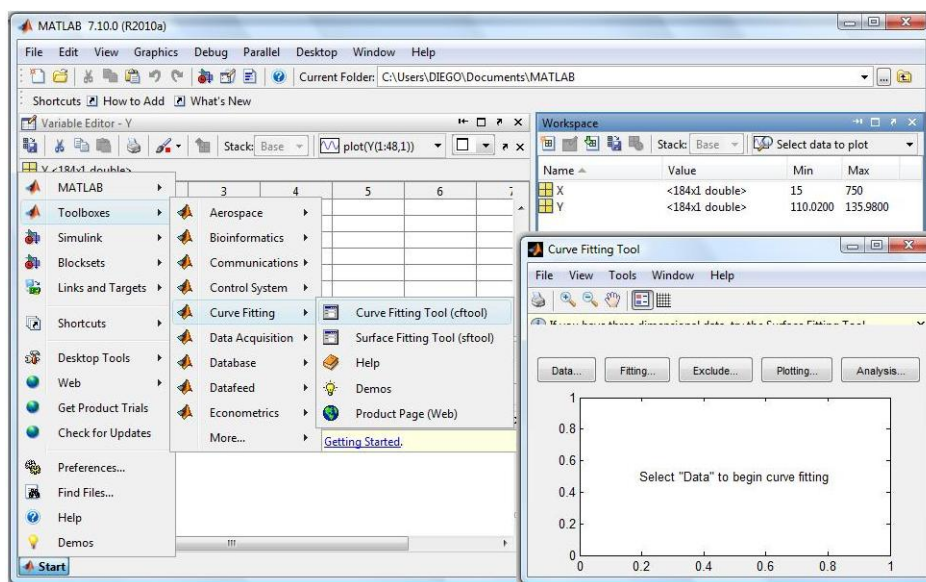


Figura 5.4. Abriendo herramienta Curve Fitting

En la herramienta *curve fitting* existen cinco parámetros de los cuales tres de estos hay que tomar en cuenta, el primero para inicializar con la implementación del modelo es *Data*. En este indicador se importa la tabla o los valores de las variables desde *Workspace* para *X Data* corresponde la matriz X, para *Y Data* la matriz Y. En *Data set name* se ingresa el nombre del gráfico para este caso Potencia (dB) Vs. Distancia (m) y finalmente para crear la potencia en función de la distancia se selecciona *Create data set*.

En la figura 5.5 se observa los 185 puntos dispersos.

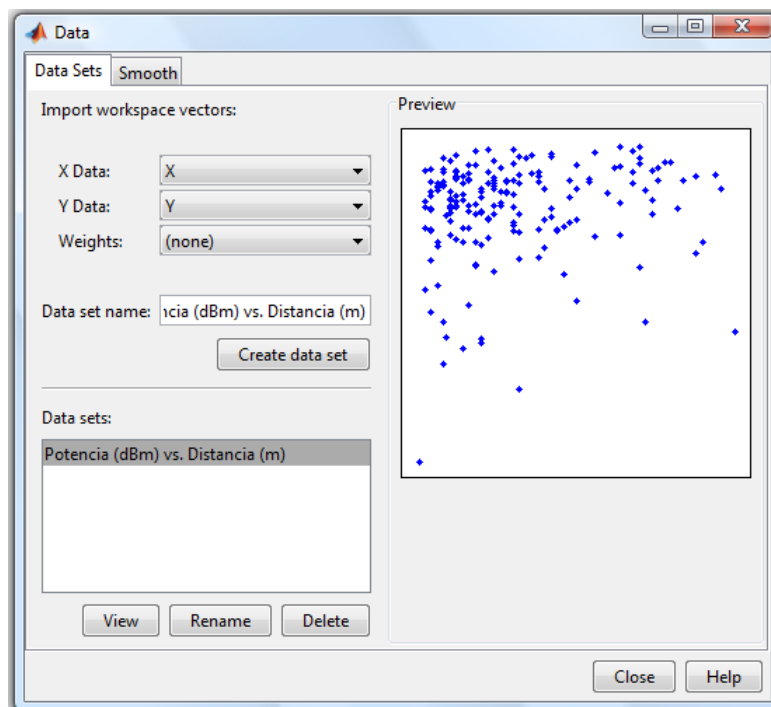


Figura 5.5. Creación de puntos Potencia (dB) Vs. Distancia (m) con la herramienta Curve Fitting

El segundo parámetro que hay que tomar en cuenta es *Exclude*, en esta ventana se puede seleccionar los puntos que deseamos ajustar a la curva deseada. Para la obtención del modelo ESPE_MODEL se van a excluir puntos en los cuales se tiene valores altos de pérdidas de potencia y que son cercanos a la antena transmisora. Se realiza este proceso por las características propias del sistema *WiMAX*, en la cual la distancia es directamente proporcional a la potencia. A menor distancia desde la antena transmisora al punto de recepción, menor pérdida de potencia. Por lo tanto los puntos que tienen un alto índice de

pérdidas, cercanos a la estación base, son excluidos. Igualmente a mayor distancia mayor pérdida, en este caso los puntos lejanos con bajas pérdidas son excluidos.

Se selecciona la opción *Exclude* la cual es parte de *curve fitting*. En esta ventana se escribe el nombre con el que vamos a guardar la exclusión de los puntos, este nombre es ESPE_MODEL. En *Select data set* importamos los puntos Potencia (dB) vs. Distancia (m). Para excluir los puntos se sigue 2 procedimientos, el primero es utilizar *Exclude Sections* y el otro es *Exclude graphically*. En el primero se ingresa el rango en X y Y que deseamos excluir, en el segundo se lo realiza gráficamente.

Los puntos que serán excluidos, son datos que están dispersos al resto de puntos, los cuales están formando una curva. Estos puntos excluidos no se ajustan a la curva y desentonan con el resto de datos por lo tanto estos no forman parte del estudio. Estos puntos excluidos se pueden apreciar en la figura 5.6. Donde además se observa el procedimiento. Los puntos excluidos están marcados por el símbolo \times y los datos que forman parte del ajuste de la curva con el símbolo \circ .

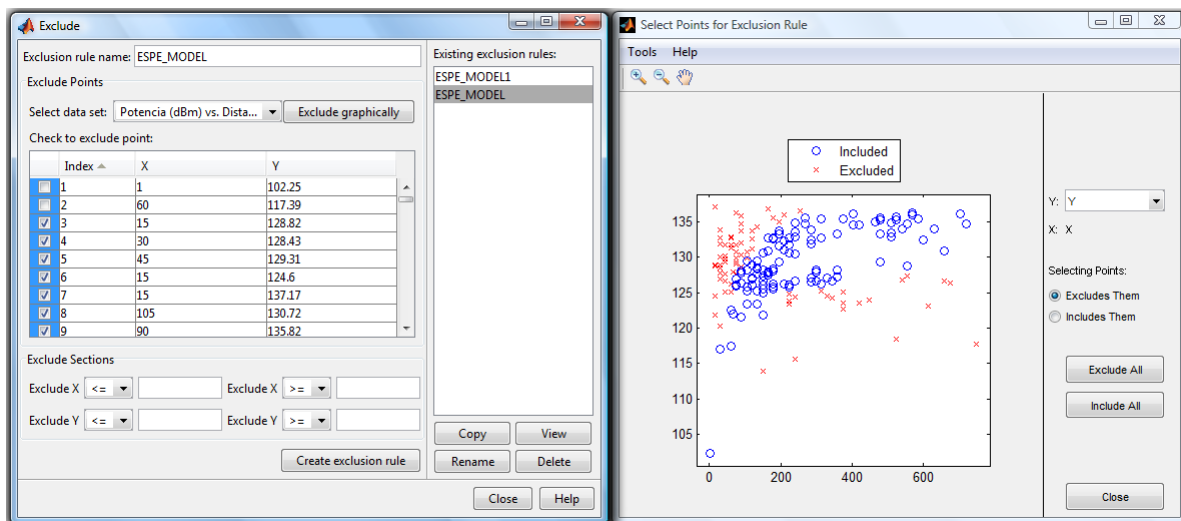


Figura 5.6. Exclusion de puntos para realizar el ajuste del modelo con la herramienta Curve Fitting

En la figura 5.7 se puede identificar los puntos incluidos y excluidos para obtener el modelo de propagación WiMAX.

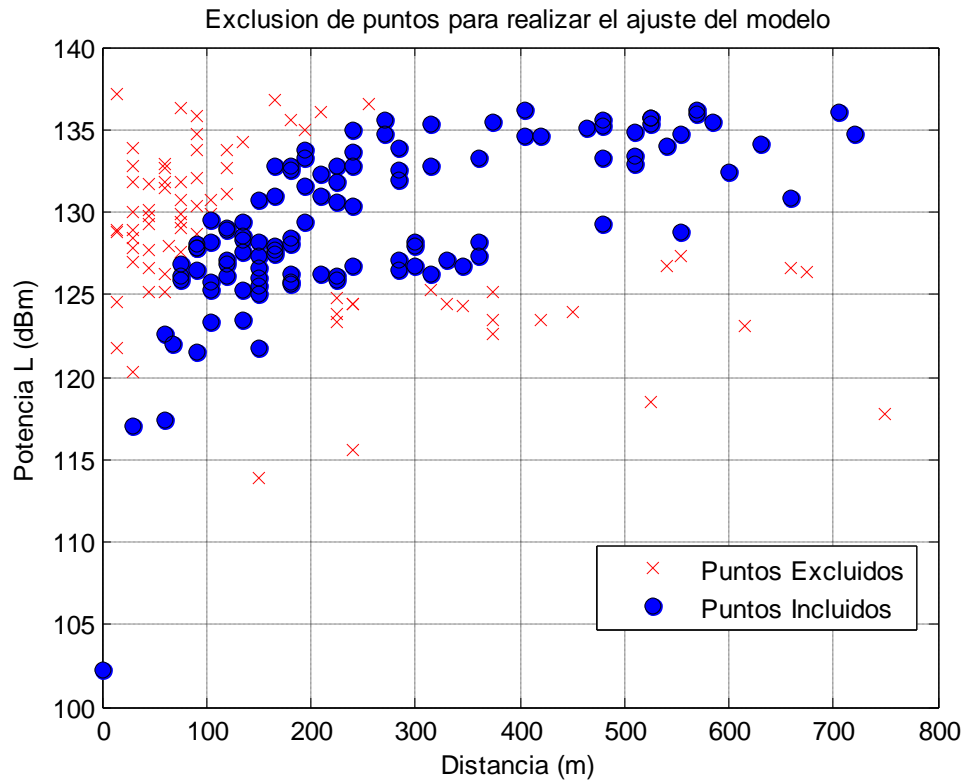


Figura 5.7. Puntos excluidos e incluidos para realizar el ajuste del modelo

El parámetro *Analysis* se utiliza para realizar otro tipo de análisis matemático para sistemas diferentes, estos pueden ser integrales y derivadas para modelos que requieran estas modificaciones. El modelo matemático que se va a encontrar en este análisis tiene el 95% de confiabilidad.

El otro parámetro importante es *Fitting* el cual sirve para encontrar la expresión del modelo matemático. Se selecciona la opción *fitting*, dentro de la herramienta *curve fitting*. Luego se escoge la opción *New fit*, se ingresa el nombre de la ecuación el cual es ESPE_MODEL, a continuación se selecciona los puntos para realizar el ajuste del modelo para este caso *Potencia (dB)* vs. *Distancia (m)*. En esta ventana se ingresa también la exclusión que ya fue definida, seleccionando *Exclusion rule* donde se importa

ESPE_MODEL. Finalmente se selecciona el tipo de ecuación a la que se quiere ajustar todos los puntos en la opción *Type of fit*, como no existe un ajuste logarítmico específico se escoge *Custom Equations*, esta función permite ingresar la ecuación o expresión a la cual se desea que se aproxime el modelo de propagación.

Todos los valores medidos de nivel de potencia recibida en el analizador de espectros se ordenaron según la distancia a la que se encontraba la antena transmisora. Como se ve en la figura 5.7 el comportamiento se ajusta más a una pérdida logarítmica según la distancia. Por esta razón se realiza una regresión logarítmica en función del recorrido del equipo receptor.

En la figura 5.8 se ingresan los datos del nuevo modelo al cual es necesario se ajuste los puntos dispersos. Se ubica el nombre de la variable independiente que es la distancia, en este caso X. Se coloca la ecuación la cual tiene una forma logarítmica y se interpreta de la siguiente forma $Y = a \log X + b$. En donde X y Y son las variables, a y b son los coeficientes que se van a encontrar. La ecuación se aproxima a otro tipo de modelos de forma logarítmica ya estudiados.

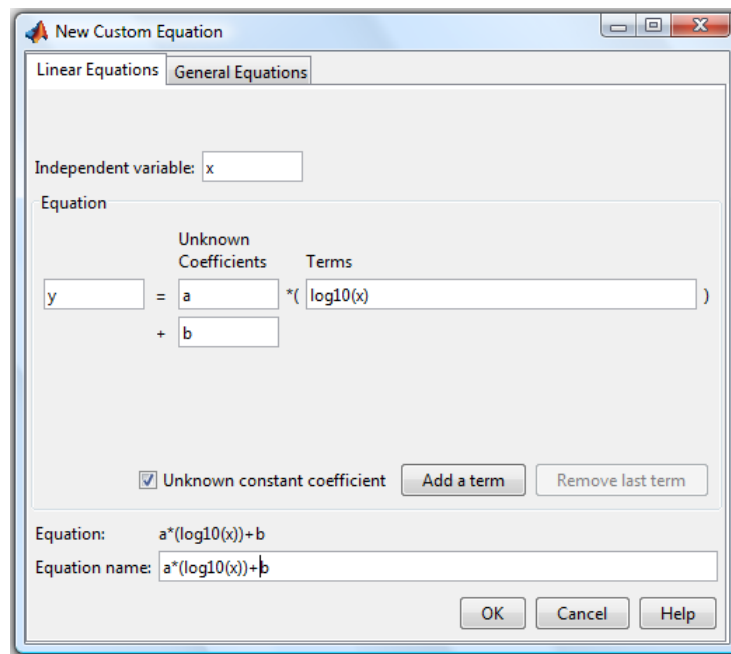


Figura 5.8. Ingreso de la nueva ecuación

En la figura 5.9 se puede observar la opción *fitting* con el nuevo modelo, se verifica que todos los datos estén ingresados correctamente y se selecciona la opción *Apply* para designar toda la información a la herramienta de procesamiento del modelo. De esta manera se puede identificar los coeficientes a y b, el porcentaje de confiabilidad y finalmente la curva y el modelo al cual se ajusto los 185 puntos y la medida de la antena.

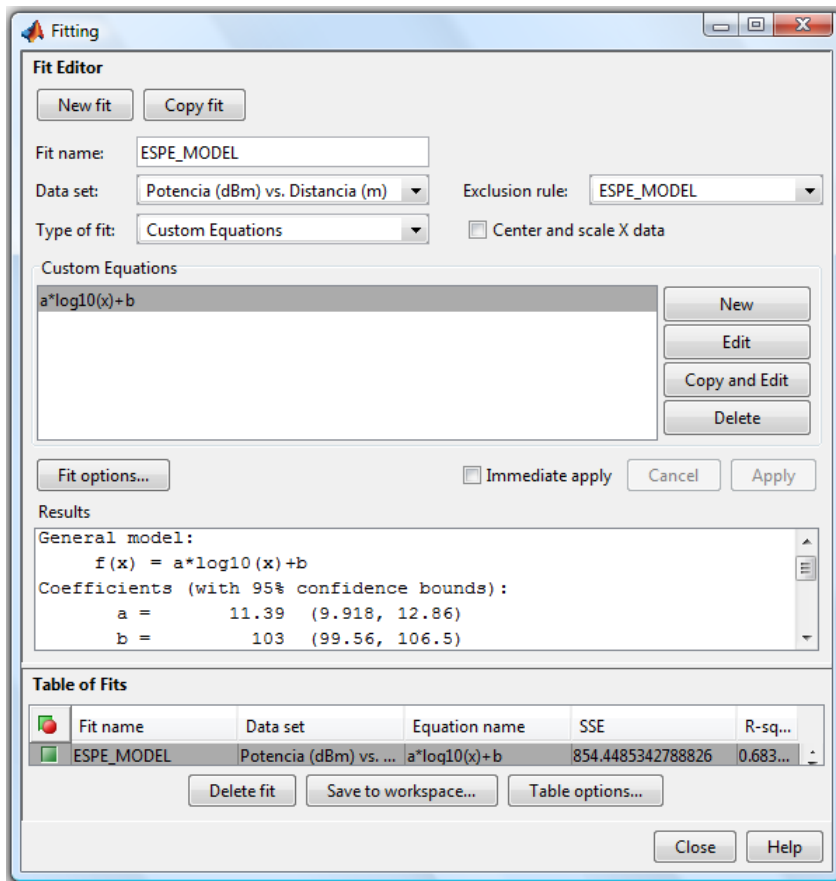


Figura 5.9. Ingreso de la ecuación logarítmica en Fit Editor

Los modelos matemáticos para propagación de señal *WiMAX* son similares a una curva creciente de forma logarítmica cuando se habla de pérdidas de propagación, su diferencia está en los coeficientes, los cuales cambian según el entorno en el cual se desenvuelve el sistema de comunicación.

En la figura 5.10 se puede identificar la curva del modelo matemático que se determinó, esta expresión sigue un ajuste logarítmico y se identifica con la herramienta *curve fitting*. En el gráfico se observa tanto los puntos dispersos de potencia en función de la distancia y, la curva ESPE_MODEL que se ajusta al promedio logarítmico de los puntos.

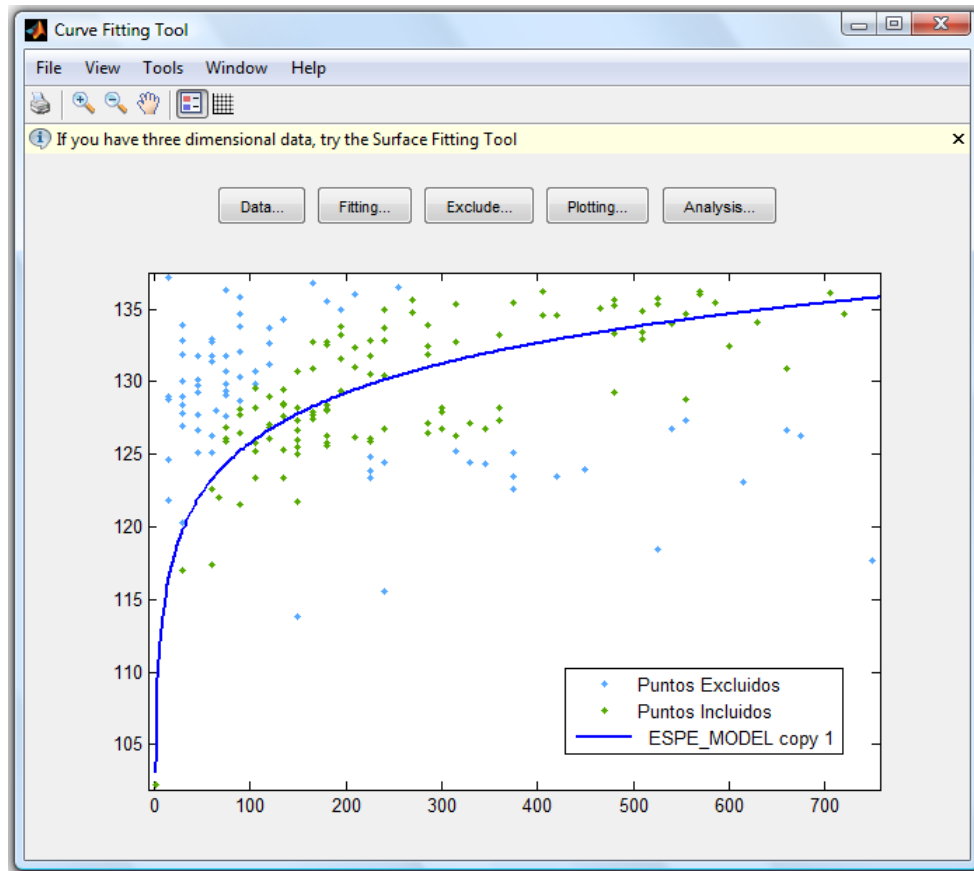


Figura 5.10. Puntos de potencia en función de la distancia y modelo de pérdidas de propagación ESPE_MODEL con la herramienta *Curve Fitting*

Finalmente en esta sección se analiza el modelo matemático que resulta de la regresión logarítmica con la ayuda de la herramienta *curve fitting*. A los datos proporcionados por el analizador de espectros se le realiza un ajuste matemático medio estimado para cada distancia. El resultado de aplicar la regresión logarítmica a estos datos medidos se obtiene de la herramienta *fitting* de MATLAB, se puede observar en la figura 5.9. Y la expresión es como se muestra a continuación.

Modelo lineal:

$$f(x) = a \times \log(x) + b \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

Coefficientes (con 95% confiabilidad):

$$a = 11,39$$

$$b = 103$$

En la ecuación 5.3 se reemplaza los coeficientes a y b , de esta manera se encuentra el modelo matemático de pérdidas de propagación de la señal para el entorno de la Escuela Politécnica del Ejército. También en la expresión antes mencionada se reemplaza la variable x por la distancia (d) y la función $f(x)$ por pérdidas del medio (L_{MEDIO}). El modelo identificado se muestra de la siguiente forma:

$$L_{MEDIO} = 11,39 \log d + 103 \quad (\text{Ecuación 5.4})$$

En la ecuación 5.4 se debe incluir la variable de la frecuencia (f), para el sistema *WiMAX* la frecuencia tiene el valor de 5,5 GHz. En la expresión encontrada esta variable forma parte de un valor constante el cual es 103. Este valor se muestra de la siguiente manera:

$$103 = c + e \times \log f \quad (\text{Ecuación 5.5})$$

Donde c y e son valores constantes, y f es la frecuencia del sistema. Hay que dar un valor a una de las constantes, se determino que e es igual a 8,85.

Se selecciono el valor de 8,85 para la constante e luego de realizar varias simulaciones en el programa SIRENET, el proceso se lo efectúa hasta encontrar la cobertura adecuada,

según los cálculos de distancia con la ecuación 5.4 a la que se añade la variable f , esta simulación se va a identificar más adelante en este capítulo. Los resultados obtenidos con el simulador se pueden observar en el inciso correspondiente, pero es necesario detallar el valor que pertenece a la constante, ya que con la misma se identifica el modelo matemático completo en relación a la distancia y frecuencia. Finalmente la constante c se va a calcular a continuación en la ecuación 5.5.

$$c = 103 - e \times \log f$$

$$c = 103 - 8,85 \times \log 5,5$$

$$c = 96,45$$

Se reemplaza los valores de las constantes en la ecuación 5.5 y finalmente se encuentra la ecuación matemática de pérdidas de propagación.

$$L_{MEDIO} = 96,45 + 8,85 \log f + 11,39 \log d$$

(Ecuación 5.6)

En esta formulación L_{MEDIO} representa las pérdidas de propagación del medio y se mide en dBm. La distancia en metros y está representada por la letra d . La frecuencia está representada por la letra f y se mide en GHz. El resultado del modelo es el patrón de radiación de la antena en el campo cercano. El modelo de propagación presentado es efecto de la relación de distancias y alturas para que se produzca la obstrucción de la señal y los efectos de difracción y reflexión en todo el entorno de la ESPE.

En la figura 5.11 se muestra la curva del modelo ESPE_MODEL en el cual se establece de igual forma la potencia de pérdidas en dBm en función de la distancia en metros.

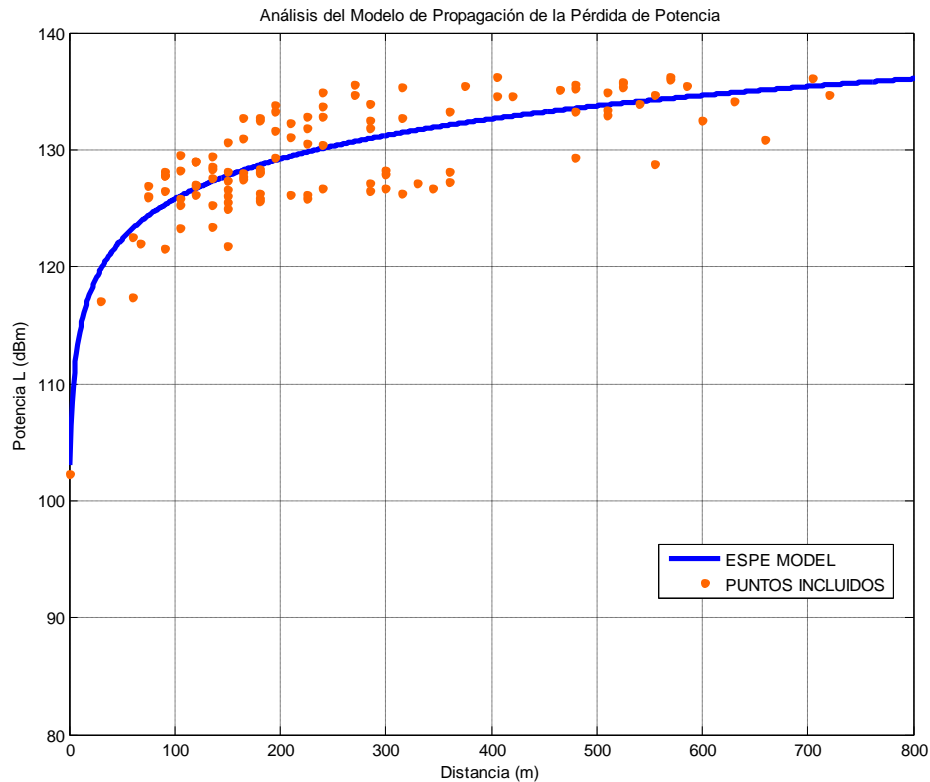


Figura 5.11. Modelo ESPE_MODEL

Modelo de Propagación de la Potencia de Recepción

Para determinar el modelo de propagación de potencia de la señal recibida se sigue el procedimiento en el cual se utiliza la herramienta MATLAB como base clave para el procesamiento de la información. Los datos que se utilizan en el transcurso de este capítulo son los proporcionados por el equipo de medición de potencia, el analizador de espectros, en los 185 puntos seleccionados y la medida del punto de la antena. Estos datos fueron procesados a través de la herramienta *curve fitting*, con este programa se obtiene el modelo matemático de propagación de pérdidas de potencia. Esta expresión más los parámetros que intervienen en la transmisión de la señal se utilizarán para la obtención de la nueva ecuación.

En cualquiera de los entornos o escenarios de la Universidad se debe hacer un cálculo conocido como el presupuesto del enlace, para analizar la expresión de propagación. En este presupuesto debemos tomar en consideración todas las ganancias y pérdidas que encontrará la

señal al atravesar cada uno de los componentes del sistema y el ambiente. Como resultado se obtiene la información de potencia de recepción en cada punto.

Cada sistema de comunicación puede tener múltiples componentes de pérdidas y ganancias, los cuales pueden variar de un sistema a otro. En este análisis se toma en cuenta la ecuación 5.1:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{ATx} + G_{ARx} - L_{cablesTx} - L_{cablesRx} - L_{MEDIO} - A_{LLUVIA}$$

Esta ecuación es muy importante para el estudio de recepción de potencia, ya que presenta todas las ganancias y pérdidas que presenta la señal al recorrer todo el proceso de transmisión y recepción del sistema de comunicación WiMAX.

Para el cálculo del nuevo modelo se parte de la ecuación 5.1 mejor llamada presupuesto del enlace, este método de identificación de la expresión matemática, es una manera segura de para obtener un mejor resultado.

En la ecuación 5.1 se conocen los datos de las ganancias de la antena transmisora y receptora, así como las pérdidas, las atenuaciones y la potencia de transmisión de la antena, esta información se detalla en la tabla 5.4. También es importante mencionar que para la obtención de este modelo se utiliza la ecuación 5.4 de pérdidas de potencia.

Tabla 5.4. Parámetros que intervienen en la transmisión y recepción de la señal

Parámetro	Nombre	Valor
P_{Tx}	Potencia de Transmisión	22 dBm
G_{ATx}	Ganancia de la antena de Transmisión	7 dBi
G_{ARx}	Ganancia de la antena de Recepción	7 dBi
$L_{cablesTx}$	Pérdida Transmisión de los cables	1,5 dBm
$L_{cablesRx}$	Pérdida Recepción de los cables	0,25 dBm
L_{MEDIO}	Pérdida del Medio	$0,7016 \log d + 125,9$
A_{LLUVIA}	Atenuación por lluvia	0,133

Los valores y expresiones presentados en la tabla 5.4 se reemplazan en la ecuación 5.1. El procedimiento se describe la siguiente forma:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{ATx} + G_{ARx} - L_{cables_{Tx}} - L_{cables_{Rx}} - L_{MEDIO} - A_{LLUVIA}$$

$$P_{Rx} = 22 \text{ dBm} + 7 \text{ dBi} + 7 \text{ dBi} - 1,5 \text{ dBm} - 0,25 \text{ dBm} - 11,39 \log d - 103 - 0,133 \text{ dB}$$

$$P_{Rx} = -68,883 - 11,39 \log d \quad (\text{Ecuación 5.7})$$

Siguiendo el procedimiento anterior de la regresión logarítmica, el modelo matemático tiene la forma de la ecuación 5.3 y con constantes a y b.

Modelo lineal:

$$f(x) = a \times \log(x) + b$$

Coefficientes (con 95% confiabilidad):

$$a = -11,39$$

$$b = -68,883$$

b corresponde a la constante de modelo encontrado, para obtener la expresión en función de la frecuencia y distancia, se modifica la constante de la siguiente manera, en la ecuación 5.8.

$$-68,883 = c + e \times \log f \quad (\text{Ecuación 5.8})$$

Si e es 8,85 y f es 5,5 Ghz, reemplazando estos valores en la expresión 5.8 tenemos que c es $-75,435$. Sustituyendo las constantes en la ecuación 5.8 y ésta en la expresión de propagación de potencia de recepción se obtiene el modelo PRX_MODEL:

$$P_{RX} = -75,435 + 8,85 \log f - 11,39 \log d$$

(Ecuación 5.9)

Los valores que se tomaron en cuenta para el análisis del modelo de propagación de potencia de recepción, son los proporcionados por la red *WiMAX* y el modelo de pérdidas antes descrito.

La ecuación 5.9 es el resultado final del procedimiento, esta sirve para identificar la potencia en cada punto de recepción.

Para graficar el modelo de recepción se procesa los datos en Editor de MATLAB, el código y resultado se muestra a continuación:

```
clc
close all
distancia=1:1:1000;
PRX=-68.883-11.39.*log10(distancia);
figure(1)
plot(distancia,PRX),grid
```

En la figura 5.12 se identifica la curva de regresión logarítmica del ajuste de potencia de recepción en función de la distancia.

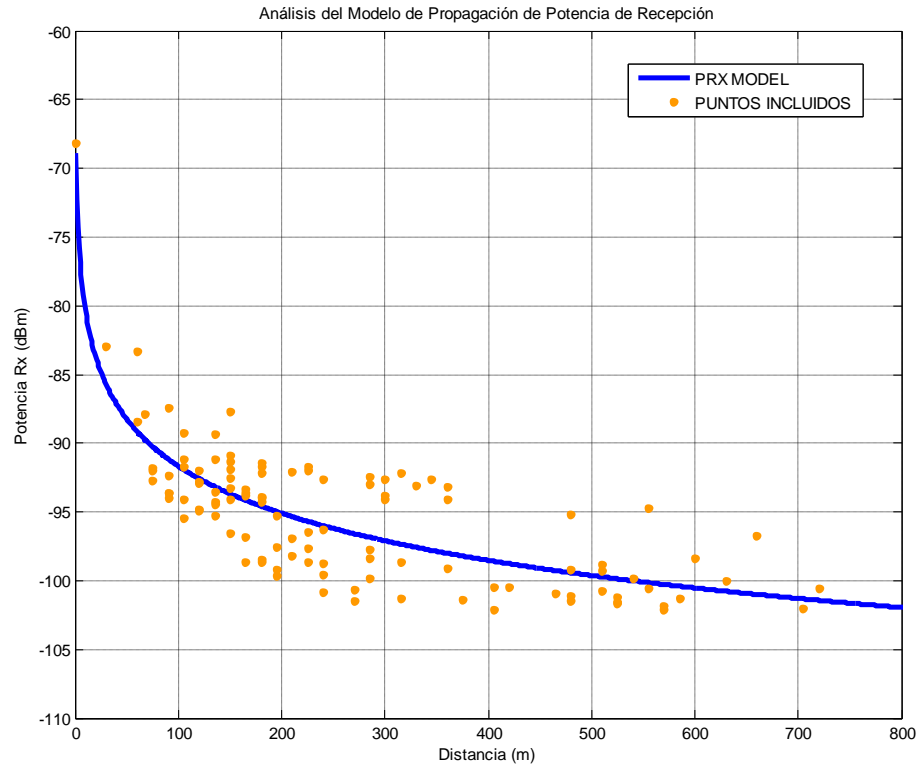


Figura 5.12. Modelo de propagación potencia de recepción PRX_MODEL

El ajuste de los puntos de potencia en función de la distancia es una regresión logarítmica decreciente de la misma forma que el modelo de pérdidas pero con otras variables y diferente pendiente.

5.3.2. Procedimiento para la obtención del área de cobertura de potencia de la señal *WiMAX*

La cobertura es un parámetro importante cuando se habla de tecnología inalámbrica. Para el caso de sistemas *WiMAX*, el término cobertura se refiere al área geográfica que cubre una estación específica. Las estaciones transmisoras y las empresas que diseñan redes generan mapas de cobertura que le indican a sus usuarios el área en la que ofrecen sus servicios. Por esta razón es importante realizar un mapa o un gráfico de cobertura para especificar la potencia que irradia la antena de la estación base.

Cuando se quiere enlazar grandes distancias es necesario identificar la potencia que cubre la red en función de la distancia, esto quiere decir que se debe especificar el radio de cobertura del sistema. La antena omnidireccional que es parte de la estación base es un caso donde se puede tener un gran cono de cobertura, por las características propias de esta antena, la cual tiene una potencia de transmisión alta e irradia potencia en todas las direcciones. Con el sistema implementado en la ESPE se puede conseguir grandes distancias, esto depende si existe o no línea de vista y puede ser afectada por interferencias y obstrucciones.

En este capítulo se identificará el área de cobertura a través del modelo matemático de propagación de potencia de recepción. Para hallar esta gráfica se debe obtener una expresión de distancia en función de la potencia de transmisión, esta ecuación es el tercer modelo que se debe encontrar para un estudio completo de propagación.

Modelo matemático en función de la potencia

Para encontrar el modelo de interés, en este caso la distancia en función de la potencia se parte de un modelo ya establecido. El diseño de este modelo sirve para analizar la cobertura, y en un futuro realizar simulaciones de propagación de la señal especialmente para los sistemas de comunicaciones.

La ecuación 5.9 es la base para encontrar el nuevo modelo, se presenta a continuación y tiene la siguiente expresión:

$$P_{RX} = -75,435 + 8,85 \log f - 11,39 \log d$$

De esta ecuación despejamos d de tal manera que el nuevo modelo nos queda en función de la potencia y la frecuencia. Para el caso de la red *WiMAX* de la ESPE f es constante y tiene el valor de 5,5 GHz. Despejando nos queda la siguiente ecuación:

$$P_{RX} = -75,435 + 8,85 \log f - 11,39 \log d$$

$$\log d = \frac{-75,435 + \log f^{8,85} - P_{RX}}{11,39}$$

$$10^{\log d} = 10^{\frac{-75,435 + \log f^{8,85} - P_{RX}}{11,39}}$$

$$d = 10^{\frac{-75,435 + \log f^{8,85} - P_{RX}}{11,39}} \quad (\text{Ecuación 5.10})$$

Se necesita una ecuación más sencilla para que esta sea manejable al momento de realizar el gráfico de cobertura. Por esta razón el modelo se expresa sin la constante f formando un solo valor. La ecuación se escribe de la siguiente manera:

$$d = 10^{-\left(\frac{68,883 + P_{RX}}{11,39}\right)}$$

(Ecuación 5.11)

La función que resultó del análisis simplifica el proceso para obtener el área de cobertura, el cual más adelante se indicará. El proceso tiene una buena precisión ya que se trabaja con una herramienta propia para este tipo de escenarios, el punto clave para tener una alta confiabilidad en los modelos encontrados es la obtención del primer modelo con la herramienta *curve fitting*. Con frecuencia, los modelos de simulación son diseñados para estudiar escenarios complejos en lugar de técnicas analíticas

Área de la cobertura de Potencia en MATLAB

Como se ha mencionado anteriormente, la cobertura útil de una red depende principalmente de la distancia y la frecuencia. Estos parámetros son los que cambian el nivel de potencia en el modelo. Para la red *WiMAX* la propagación de la señal es muy amplia, ya que no es necesario preocuparse por posibles colisiones y obstrucciones, ya que la red trabaja bajo estas circunstancias. La antena de la estación base combina múltiples elementos asociados a un procesador de señal capaz de optimizar la cobertura de la señal.

En esta parte se muestra el proceso para identificar el área de cobertura a través de un gráfico, para lo cual se utiliza la ecuación 5.11. En esta expresión la distancia está en función de la potencia de la señal que se recibió. La función expresada matemáticamente tiene la siguiente expresión:

$$f(z) = 10^{-\left(\frac{68,883+z}{11,39}\right)}$$

El área de cobertura se halla con una simple programación en el *Editor* de MATLAB, el algoritmo utiliza el graficador *cylinder*. Con este comando se forma el cilindro de la función basada en generar la curva en el vector R. Esto quiere decir que genera una superficie en 3D de la función a lo largo del eje especificado.

Para el caso del presente análisis, la huella de cobertura se genera al girar la curva sobre el eje X, y luego normalizarse con el eje Z. Por esta razón es necesario utilizar la función de la ecuación 45, de tal manera que la distancia se encuentra en el eje Z y la potencia está en el eje X. Esto quiere decir que la distancia forma una circunferencia al girar sobre el eje de la potencia, y la potencia es normalizada. La superficie de la circunferencia está entre los puntos máximos y mínimos de la distancia, el mínimo corresponde al valor negativo de la máxima distancia, esto es solamente una representación del radio de la circunferencia ya que la distancia no se representa en intervalos negativos.

La distancia que forma la circunferencia contiene el radio, el mismo que genera un valor en potencia a lo largo de la altura de la unidad del cilindro. El cilindro tiene N puntos alrededor de la circunferencia. Cada una de estas circunferencias está representada por un color según la altura que alcance la potencia. Por lo tanto en el gráfico del área de cobertura se puede observar una coloración para cada rango de potencia, esto quiere decir que a una determinada distancia el resultado en potencia es un color.

Para generar el gráfico de huella de cobertura de los modelos de encontrados en función de la potencia de recepción se procesa los datos en Editor de MATLAB, el código y resultado se muestra a continuación:

```

clc
close all
P=-105:0.5:-68
D=10.^((-P-68.883)/11.39)
figure(1)
plot(P,D),grid
figure(2)
cylinder(D)

```

El algoritmo que se muestra tiene la capacidad de generar dos tipos de figuras en la primera es la ecuación distancia en función de la potencia, esta corresponde a *figure(1)*. La segunda figura es la que más nos interesa, en la cual se muestra la huella de cobertura, esta corresponde a la *figure(2)*. Dentro de este gráfico se realizan una serie de cambios para visualizar el área de cobertura, de la manera que nos interesa para nuestro estudio. En la tabla 5.5 se muestra los colores que representan un rango de potencia del modelo de propagación de recepción de la señal.

Tabla 5.5. Colores del área de cobertura respecto a los Rangos de Potencia y Distancia

RANGO DE POTENCIA	RANGO DE DISTANCIA	ESPECIFICACIÓN
$-94 \text{ dBm} \leq P < -75 \text{ dBm}$	$160,39 \text{ m} \leq D < 3,44 \text{ m}$	
$-98 \text{ dBm} \leq P < -94 \text{ dBm}$	$360,05 \text{ m} \leq D < 160,39 \text{ m}$	
$-100,6 \text{ dBm} \leq P < -98 \text{ dBm}$	$609,03 \text{ m} \leq D < 360,05 \text{ m}$	
$-104 \text{ dBm} \leq P < -100,6 \text{ dBm}$	$1211,00 \text{ m} \leq D < 609,03 \text{ m}$	

En la figura 5.13 se identifica la curva exponencial del ajuste del modelo de la distancia en función de la potencia.

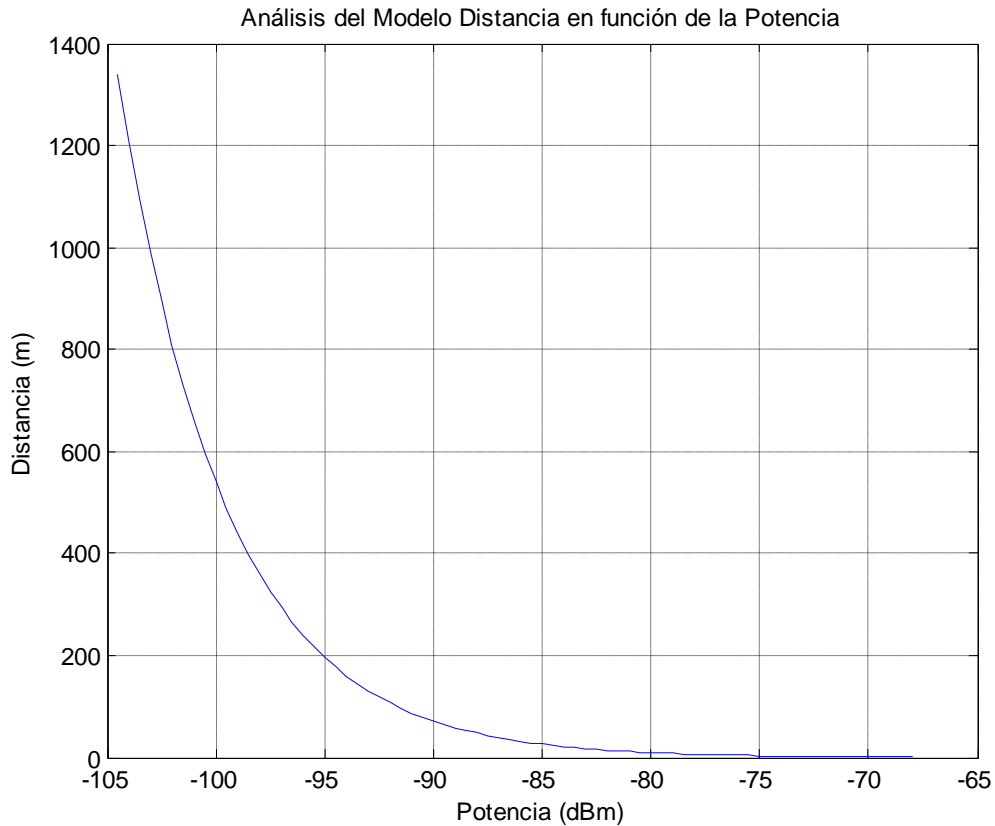


Figura 5.13. Modelo Distancia en función de la Potencia de Recepción D_MODEL

En la figura 5.14 se muestra el área de cobertura respecto al modelo de la distancia en función de la potencia, el cual fue realizado con el algoritmo cylinder. En este gráfico se puede observar la figura cilíndrica que forma la curva del modelo de la distancia. La manera como se procesa esta información se explicó anteriormente.

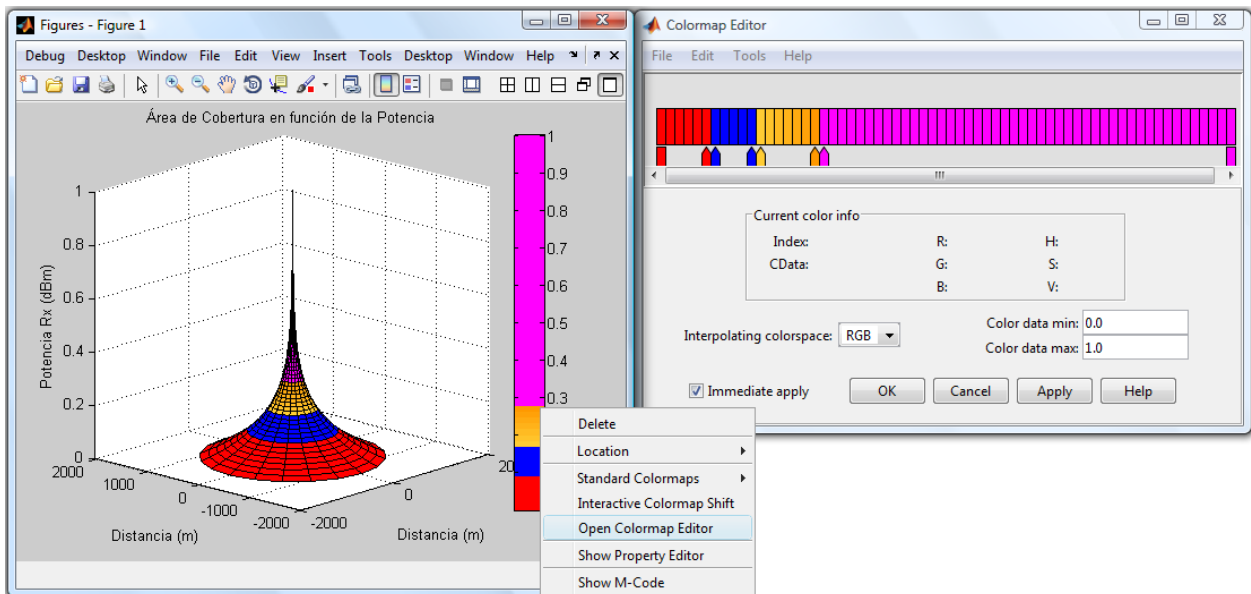



Figura 5.14. Cilindro que forma la curva del modelo y edición de la barra de colores

En la figura 5.14 se observa la edición de los colores del cilindro. Primero se selecciona el icono , el cual realiza la función de insertar la barra de colores. El siguiente paso es modificar la barra, con la función *Open Colormap Editor*, en este momento se abre otra ventana. En la ventana de edición de la barra de colores, modificamos la misma respecto a la distancia que recorre.

La edición se realiza con cuatro colores: rojo, azul, naranja y magenta que corresponden a la intensidad de potencia en cada punto, en función de la distancia. El rango para cada color se puede observar en la tabla 5.5.

En la figura 5.15 se muestra el área de cobertura de la superficie circular que forma el modelo de la distancia en función de la potencia al girar en el eje X. En el gráfico ya están modificados los rangos de potencia y distancia para cada color.

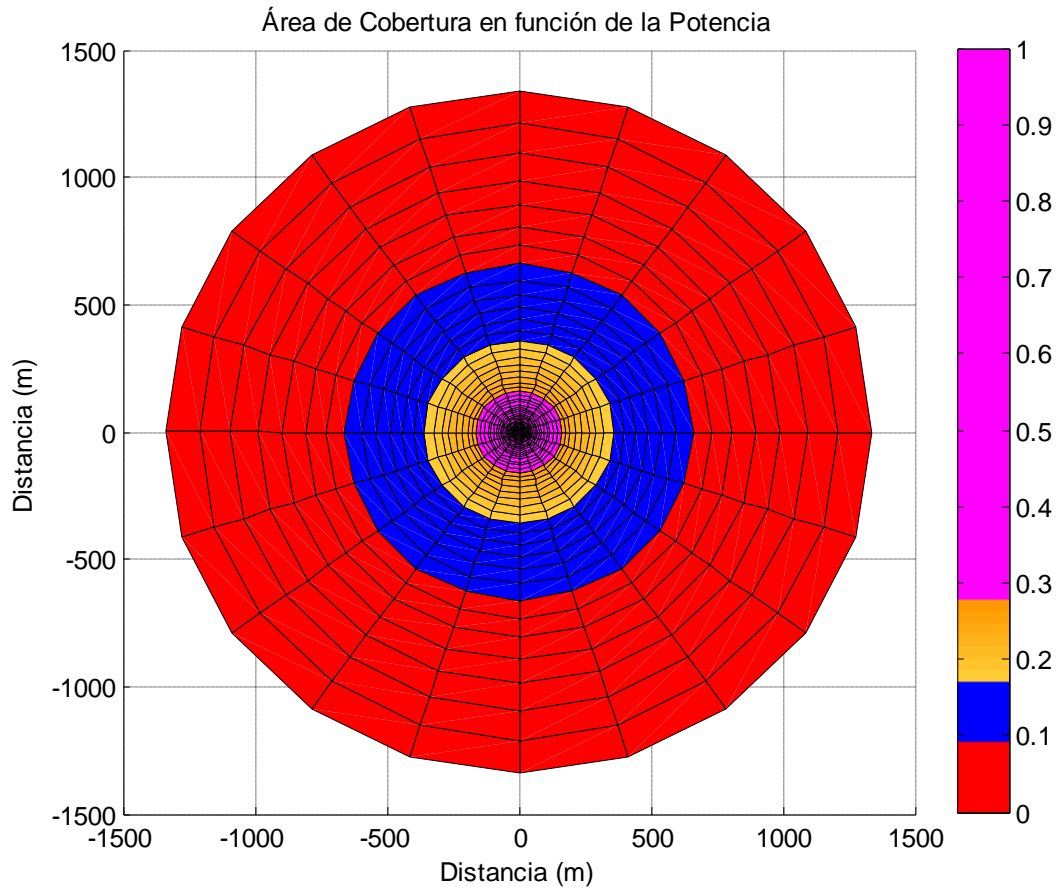


Figura 5.15. Área de cobertura

En el gráfico podemos ver el área de cobertura que se obtiene con el modelo en estudio en el campus de la ESPE. El centro de la circunferencia representa la estación base donde se encuentra la antena transmisora. El área de la circunferencia roja demarca el área de cobertura más débil. Dentro de esta área la señal es baja a pesar de tener cobertura y enlace con la estación transmisora, los equipos deben presentar potencias y sensibilidades muy grandes para recibir y procesar las señales transmitidas. Se hace un poco difícil la transmisión, debido a que se presentan algunas interferencias en el espectro de potencia y a la distancia. Se puede observar esta área de cobertura a partir de los 700 metros.

En el área de color azul se obtiene una mediana cobertura sin embargo los equipos pueden trabajar en condiciones óptimas y reciben la señal transmitida por la Radio Base. Esta área se encuentra en el rango de distancia de 360 a 700 metros aproximadamente.

El círculo naranja y magenta demarca el área principal de cobertura, donde la señal es más fuerte y sin interferencias. En estas zonas se obtiene una excelente cobertura y los equipos pueden trabajar en condiciones favorables. En toda esta área se recomienda colocar estaciones suscriptoras ya que con facilidad se receptan las señales transmitidas por la radio base. El rango de la distancia corresponde de 160 hasta 360 metros aproximadamente para el área de color naranja y de 0 a 160 metros para la circunferencia magenta.

5.4. Análisis de propagación del Modelo ESPE_WiMAX con otras expresiones

Esta fase corresponde al análisis comparativo del modelo ESPE_MODEL con el resto de modelos de propagación de la señal *WiMAX* con el objetivo de optimizar el estudio de propagación y perfeccionar los procesos relacionados con el diseño de estas redes.

Los resultados del modelo de propagación permiten desarrollar en este punto algunas conclusiones importantes respecto al resto de expresiones y aportar realimentación a otras actividades de investigación y desarrollo en ejecución de sistemas *WiMAX*. Adicionalmente, gran cantidad de modelos consideran solo algunos fenómenos y en consecuencia deben aplicarse varios de ellos antes de obtener un resultado práctico. Por esta razón se selecciona ciertos modelos que trabajen en general bajo todos los fenómenos de propagación.

En términos generales, los modelos de propagación del medio buscan predecir el nivel de pérdida de potencia que una señal de ciertas características sufre cuando se propaga por un ambiente geográfico determinado. Es por esta razón que se han encontrado diferentes modelos matemáticos dependiendo éstos del tipo de entorno en el cual se encuentre la red. Por este motivo los modelos que se acoplan de cierta manera al ambiente de la Escuela Politécnica del Ejército son específicamente el modelo SUI y el COST 231 Walfisch-Ikegami (C231 W-I). Estos dos modelos se acoplan ya que constan de ciertos factores empíricos de corrección. El parámetro más importante de corrección es la frecuencia ya que el sistema *WiMAX* de la ESPE trabaja a 5,5 GHz en una banda no licenciada. Otro parámetro que fue corregido en las ecuaciones fue la altura de recepción y el ambiente. Para el caso específico de COST 231 W-I

se toma en cuenta la infraestructura del campus de la ESPE por lo tanto es un modelo más complejo y completo.

La tecnología WiMAX opera en bandas de frecuencia y en condiciones para las cuales pocos modelos de propagación del medio desarrollados hasta el momento aplican de manera eficiente, debido a que aquellos que ofrecen resultados más aproximados a la realidad han sido construidos empíricamente y su extrapolación a otras bandas de trabajo y condiciones de operación es compleja si se quiere garantizar exactitud razonable. Por esta razón fue necesario construir un modelo que se acople a las condiciones específicas de la red, sin embargo dos de todos los modelos de propagación funcionan bajo las condiciones propias del sistema para el campus de la ESPE.

Es necesario también realizar la comparación del modelo construido con dos modelos básicos de propagación el primero es el modelo matemático *Free Space*. Es un modelo de propagación general que básicamente representa el rango de comunicación como un círculo de radio d , alrededor del transmisor. Se considera un modelo ideal por esta razón se selecciona esta expresión para el respectivo análisis. Este modelo no considera un entorno terrestre con obstáculos, y las demás correcciones de frecuencia, altura y entorno.

El otro modelo es una expresión general que trabaja en condiciones parecidas para el caso del sistema WiMAX para la ESPE. Se trata del modelo COST 232 Okumura-Hata. Una de las aportaciones de este modelo y la razón por la cual fue seleccionado es que en la expresión se puede considerar pérdidas por dispersión. Además se realiza las correcciones más básicas y generales.

Se denota también que se encontraron diversas clasificaciones y descripciones de los modelos de canal desarrollados hasta el momento por varios autores, pero de dichas clasificaciones, se seleccionó ciertos modelos los cuales se describieron en el capítulo II. Y de estos se selecciono los más importantes para realizar el análisis con el modelo matemático que se encontró en este capítulo. En la tabla 5.6 se desarrolla una tabulación general para los

modelos de canal más importantes con los cuales se cuenta en la actualidad, los mismos que serán comparados con el modelo ESPE_MODEL. La tabla cuenta con información de todos los modelos, cada uno con su respectiva fórmula con la cual se va a construir la gráfica de análisis de modelos de propagación.

Tabla 5.6. Modelos matemáticos de propagación

MODELO	DESCRIPCION	EXPRESIÓN
Espacio Libre (<i>Free Space</i>)	Se considera un modelo ideal relacionado con las condiciones de propagación en el vacío.	$L = 32.44 + 20 \log f + 20 \log d$
COST 231 Ohumura- Hata	Se acopla a las características de la red. Es una combinación de simulaciones estadística.	$L[dB] = -5,039 - 2(\log f)^2$ $+ 26,498 \log(f)$ $+ 37,6 \log(d)$
COST 231 Walfisch- Ikegami	Considera la difracción hasta el nivel de las calles y algunos factores empíricos de corrección.	$L_b = -5,301 + 25,3 \log(f) + 0,747f \log(f)$ $+ 2,271f + 38 \log(d)$
SUI	Es posible predecir más exactamente la cobertura.	$P_{L_{modificado}} = -24,596 + 26 \log f$ $+ 50,73 \log d$

Se realiza el análisis con estos cuatro modelos y el modelo de propagación encontrado para el campus de la ESPE, para encontrar las curvas propias de cada expresión se sigue el procedimiento anterior, con el cual se construyó el modelo ESPE_MODEL. Para identificar los puntos para cada modelo se describe el siguiente algoritmo.

Con este algoritmo se obtienen las tablas de potencia de los 185 puntos más el valor de potencia de la antena en Workspace para los cuatro modelos. Esta información corresponde a la potencia de pérdida en cada punto para cada uno de los modelos.

```
clc
close all
f=5.5;
E_LIBRE=32.44+20*log10(f)+20*log10(X);
SUI=-24.596+26*log10(f)+50.73*log10(X);
COST_O_H=-5.039-2*(log10(f))^2+26.498*log10(f)+37.6*log10(X);
COST_W_I=-5.301+25.3*log10(f)+0.747*f*log10(f)+2.271*f+38*log10(X);
```

Es a partir de este instante que se puede trabajar con la herramienta *curve fitting* ya que toda la información de potencia y distancia esta descrita en *Workspace*. El procedimiento es similar al modelo ESPE_MODEL, con la diferencia de hallar las curvas de los cuatro modelos.

En la figura 5.16 se presenta el análisis comparativo del modelo ESPE_MODEL con el resto de modelos. En el gráfico se visualiza cada modelo con un color diferente, además están solamente los puntos que se consideran óptimos para identificar la expresión ESPE_MODEL que se encontró a partir del ajuste de los puntos dispersos. Para detallar de mejor manera la imagen se presenta la leyenda del grafico con el color y el modelo que le corresponde.

Gráficamente es fácil confirmar el ajuste de la regresión a los valores medidos. Con visualización de la formulación desarrollada y el resto de modelos sobre los puntos con los valores medidos es necesario realizar el respectivo análisis con cada expresión que se puede identificar.

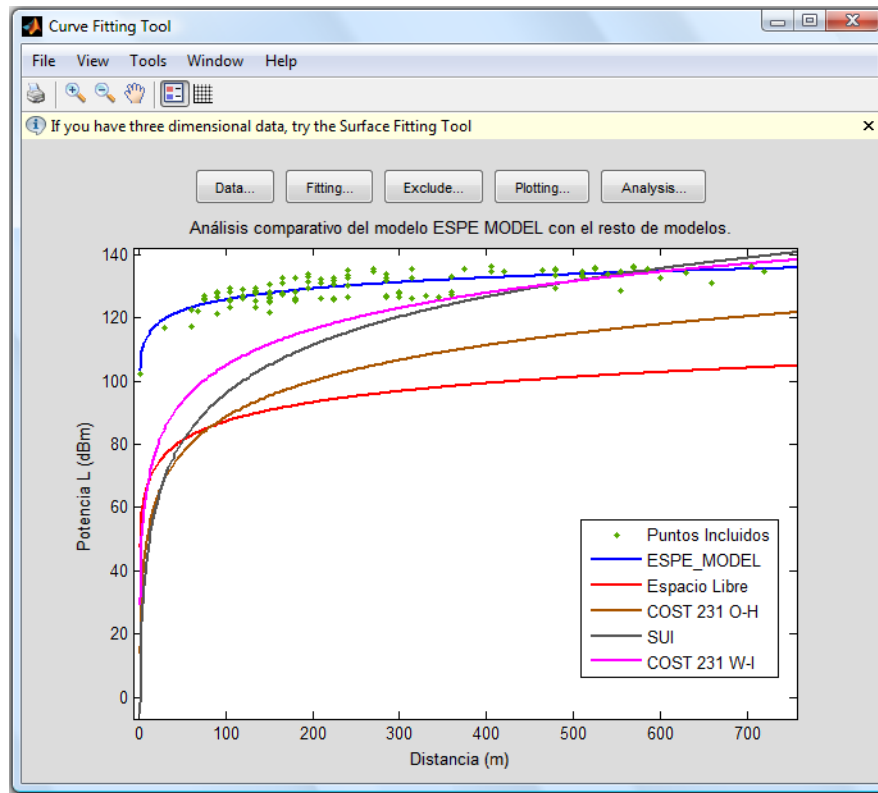


Figura 5.16. Análisis comparativo con la herramienta Curve Fitting

Si comparamos el modelo *Free Space* que en la gráfica tiene un color rojo, se puede determinar que los puntos dispersos no se parecen en lo absoluto, no concuerda ningún punto de potencia con el modelo del autor. Comparando el modelo ESPE_MODEL con el modelo en el espacio libre se puede observar que tienen una diferencia en potencia de 50 dBm esto representa un error muy grande. La pendiente y la subida de potencia son parecidas con la diferencia de un salto de potencia en el modelo que se construyó. Esto sucede ya que la expresión Free Space no toma en cuenta parámetros como atenuaciones por obstrucciones, la frecuencia y los fenómenos presentes, que han sido analizados en lo que se va ejecutando el proyecto.

El siguiente modelo a ser analizado es el COST 231 Okumura-Hata, esta expresión se acerca más a la realidad ya que toma en cuenta varios parámetros de corrección, sin embargo según la gráfica el modelo no se ajusta al sistema, tiene cierta cantidad de puntos que concuerdan con la curva, pero estos son muy pocos. El modelo ESPE_MODEL tiene una

diferencia en potencia con el COST 231 O-H de 40 dBm aproximadamente, este valor se reduce a mayor distancia. Tanto la subida de la curva como la pendiente logarítmica no se parecen con el modelo de propagación de la ESPE. La coloración que corresponde a este modelo es café.

Para continuar con el proceso de análisis, el siguiente modelo a ser comparado con el propio del sistema es el modelo SUI, el cual tiene cierta semejanza a partir de los 400 metros con el modelo ESPE_MODEL, en un rango menor de distancia de 0 a 400 metros la diferencia con el modelo es de 30 dBm aproximadamente y esta diferencia se reduce cuando la distancia va creciendo. En el rango mayor de distancia existen puntos que concuerdan con el modelo, pero también se puede identificar que la curva crece rápidamente cuando la distancia es mayor, lo cual no es una característica del modelo que se encontró en este estudio. La curva es de color negro del modelo SUI.

Para finalizar con este análisis, es indispensable comparar el modelo COST231 Walfisch-Ikegami al cual le corresponde la curva de color violeta con el que se encontró para la red *WiMAX*, este modelo es el que más se aproxima a la realidad, es muy semejante al modelo SUI, pero la creciente y pendiente son diferentes para un rango menor de distancia. Los 185 puntos dispersos concuerdan en su mayoría con la curva o por lo contrario existen puntos que no concuerdan pero la diferencia en potencia es menor al resto de modelos. La ecuación que se encontró con este modelo se realizó para situaciones y entornos similares a la Universidad. Este modelo es el que más concuerda ya que tiene correcciones tanto de frecuencia, como de altura de recepción, también se toma en cuenta parámetros como cantidad de edificios, altura de los mismos, ancho de las calles, en pocas palabras el modelo a pesar de ser complejo es completo. La creciente del modelo COST-231 es más pronunciada que la del modelo desarrollado.

Se presenta una grafica comparativa para dar soporte al estudio de propagación. En la figura 5.17 se puede identificar el modelo ESPE_MODEL y el resto de modelos.

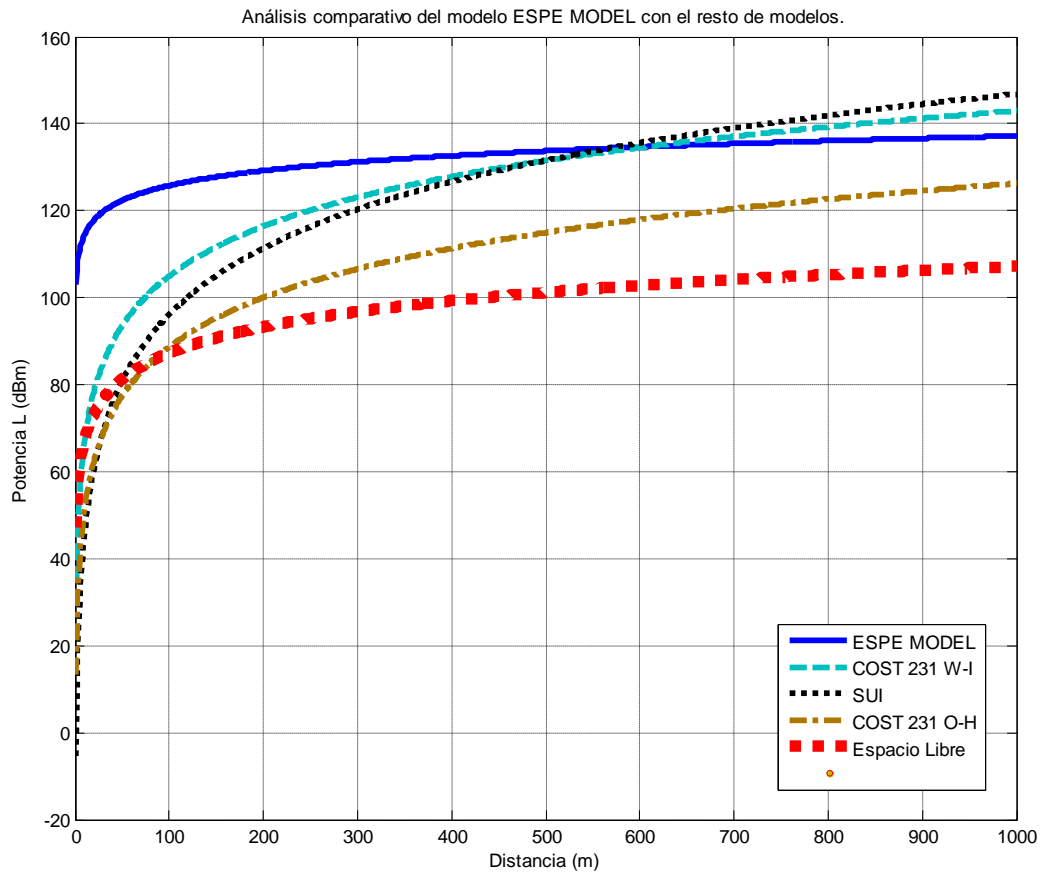


Figura 5.17. Análisis comparativo del modelo ESPE_MODEL con el resto de modelosB

Adicionalmente se incluye en este estudio la comparación del modelo RX_MODEL con el resto de modelos de propagación de recepción de otros autores. Para el análisis se sigue el procedimiento anterior, donde se obtienen las tablas en *workspace* y a partir de estas se identifica la gráfica trabajando con *curve fitting*. Luego de la obtención de la figura 5.18 se realiza las respectivas conclusiones.

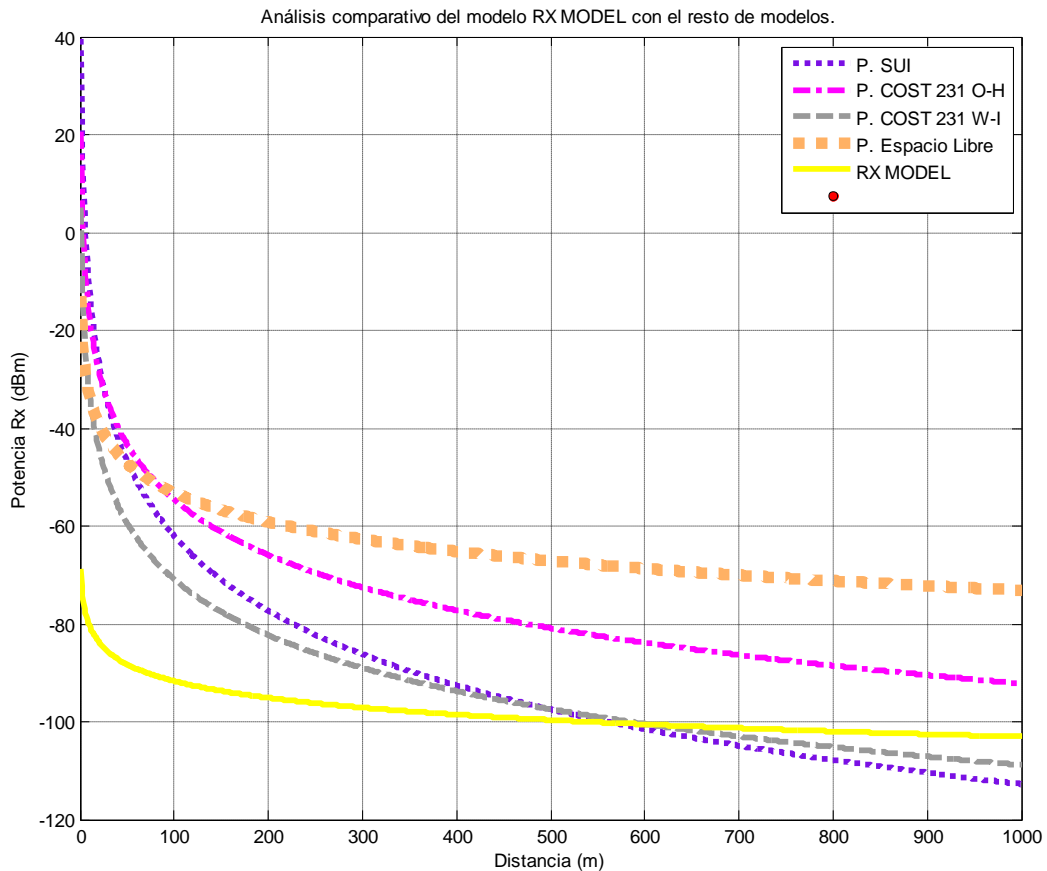


Figura 5.18. Análisis comparativo del modelo RX_MODEL con el resto de modelos

El comportamiento del modelo RX_MODEL con el resto de modelos es similar al que ya se analizó para pérdidas de potencia, la única diferencia es que las curvas para este caso son decrecientes, por lo tanto las diferencias establecidas para estos modelos se basan en la caída de la curva, la pendiente logarítmica y la diferencia de potencia entre todos los modelos y el propio para la red *WiMAX* de la ESPE.

Para concluir con el estudio de todos estos modelos es necesario determinar los errores que tienen cada uno de ellos con la realidad. Esto también determina la validez del modelo que se construyó, para comparar la exactitud del modelo calculamos el error del valor medido a una distancia con el calculado usando el modelo desarrollado y los demás modelos propuestos por otros autores. Para realizar este análisis se utiliza la ecuación 5.12 descrita a continuación.

$$\%E = \frac{|Valor_{MEDIDO} - Valor_{CALCULADO}|}{Valor_{MEDIDO}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5.12})$$

Este cálculo se realiza en cada uno de los 184 puntos y el punto adicional de la antena. Luego de tener el porcentaje de error respecto al valor real medido se realiza el promedio de los 185 errores que se obtienen en todos los puntos. De tal manera que se alcanza un error medio tanto para el modelo ESPE_MODEL como para el resto de expresiones. En la tabla 5.7 se puede identificar este análisis.

Tabla 5.7. Promedio de error de cada Modelo respecto a las medidas reales de potencia

MODELO	PROMEDIO %E
ESPE_MODEL	3,57 %
FREE SPACE	29,36 %
SUI	25,71 %
COST 231 O-H	19,09 %
COST 231 W-I	14,04 %

Se demuestra en el presente estudio que el modelo encontrado para el Campus Politécnico es el correcto ya que nos arroja un error del 3,57 %, este error es menor al aceptable el cual es 5 %, con lo cual se manifiesta un resultado positivo en el modelo construido. El modelo SUI y COST 231 W-I son las expresiones con un menor porcentaje de error en comparación al resto pero no funcionan de la misma manera que el modelo ESPE_MODEL, que específicamente es apto para un entorno universitario con las características de la ESPE.

Como se analizó anteriormente el modelo que más se acerca a la realidad es el COST 231 W-I, obviamente después del modelo propio de la red. El modelo COST 231 W-I tiene un porcentaje de error de 14,04 % que a pesar de ser un valor alto, es el menor en comparación al resto, igualmente se puede trabajar con este modelo pero con resultados no tan eficientes como el que nos entrega el modelo ESPE_MODEL.

El desarrollo de este proyecto permitirá contar con herramientas que ayuden en el planteamiento de nuevas técnicas de transmisión de datos a través de tecnología *WiMAX* así como también analizar el comportamiento de otros entornos respecto de la transmisión con relación a la variación de parámetros como potencia, cobertura, accesos, entre otros.

5.5. Simulación de propagación con el programa SIRENET

En el capítulo III se dio una breve introducción sobre el programa SIRENET, el cual es una herramienta de planificación y gestión radioeléctrica que permite planificar, de manera rápida y eficiente, cualquier tipo de red que utilice como medio de transmisión el aire. Para el proyecto actual es fundamental utilizar este simulador para predecir el buen funcionamiento del modelo en el campus de la Escuela Politécnica del Ejército, de esta manera si el modelo no es eficiente se debe realizar las correcciones y ajustes de los coeficientes de la expresión. En el caso contrario, si se obtiene resultados positivos con el simulador, valida la confianza del modelo encontrado.

La herramienta basa su funcionamiento, en la simulación de entornos reales apoyándose en un avanzado sistema de información geográfica. Mediante el simulador se obtiene la reproducción exacta del comportamiento de los equipos propios de la red *WiMAX*. Para analizar el modelo el programa utiliza los algoritmos más avanzados y actuales para la predicción de la propagación de la señal, de esta manera se verifica la cobertura de la red con el nuevo modelo matemático.

El programa es ideal tanto para supervisar las redes ya en servicio como para planificar las que se vayan a desplegar en el futuro. En un anterior proyecto, importante para la realización de este estudio, se realizó una simulación para implementar la red, los resultados fueron positivos, y la red fue puesta en marcha. Para continuar con la investigación se tomo medidas de potencia y se encontró el modelo propio de la red. En el presente proyecto es necesario supervisar la eficiencia y el alcance de la red con el nuevo modelo. Por lo tanto el simulador actúa como controlador en la fase final del estudio de propagación.

5.5.1. Simulación en SIRENET con el nuevo modelo matemático de propagación

El uso básico del simulador es bastante simple, primero para inicializar la herramienta se establece un nuevo proyecto con el nombre ESPE_WIMAX y con una breve descripción del mismo “*Simulación de propagación con el nuevo modelo matemático*”. A continuación se crea un nuevo estudio donde se establecen las características de la red. El principal parámetro que se requiere simular es la cobertura, este genera un análisis de todos los equipos del sistema que se han generado durante la simulación.

Luego se pueden ingresar los parámetros generales que serán utilizados en todas las simulaciones dentro de este estudio, los mismos que están relacionados con el tipo de cartografía, así como el modelo de propagación que se lo puede elegir, modificar o crear en la opción Métodos de Cálculo. Para la investigación se va a crear un nuevo modelo por lo tanto se selecciona *Editable y Nuevo*.

Para dar comienzo a la creación del modelo dentro del programa SIRENET, se abre la ventana que corresponde a los parámetros generales de cálculo, en la misma se ingresa el nombre del nuevo modelo que para este caso es ESPE_MODEL. A continuación se ingresa el factor k y la resolución que corresponden a los valores de $4/3$ y 100 respectivamente. En la pestaña que corresponde a método se selecciona *Editable Ampliado*.

En la pestaña *Editable Ampliado* se van a añadir todas las variables que corresponden al nuevo modelo matemático, primero vamos a ingresar el valor constante del operador logarítmico para lo cual la distancia en la expresión debe estar en m. Otro parámetro importante en este punto es la frecuencia, este valor puede cambiar totalmente la cobertura que se desea obtener con el simulador. Por tal motivo hay que modificar el valor constante de la ecuación 5.4 para que finalmente la expresión resulte en función de la distancia y frecuencia, este paso se lo realiza a continuación.

$$L_{MEDIO} = 11,39 \log d + 103$$

El valor constante de la ecuación es 103, este valor se convierte en una expresión con una constante y la variable frecuencia, de tal manera se obtiene la expresión 5.5.

$$103 = c + e \times \log f$$

Donde c y e son valores constantes, y f es la frecuencia del sistema. Hay que dar un valor a una de las constantes, por tal motivo se tiene que ir alternando e hasta obtener una expresión en la cual la cobertura con el modelo ESPE_MODEL se asemeje a los valores de la tabla 5.5. La cual corresponde a los colores del área de cobertura respecto a los rangos de potencia y distancia.

Al analizar la cobertura luego de ingresar todos los datos y parámetros completos necesarios para obtener la huella de potencia se determina si el valor e es el ideal para el modelo matemático. Este análisis se realiza de la siguiente manera, primero se ingresa un valor alto, aproximado al valor constante de 103, el resultado obviamente es negativo se realiza este procedimiento en pasos de 10, esto quiere decir que para el siguiente intento el valor de e es igual a 93, 83, etc. Finalmente se llega al último valor que es 3, el resultado igualmente es negativo ya que se obtiene una cobertura exagerada, con distancias superiores a las que se alcanzan en la tabla 5.5. Por lo tanto se puede identificar que los valores para e se encuentran entre 3 y 13. Luego se realizan varias simulaciones y comparando estas con los valores de la tabla se identifica que el valor óptimo es de 8,85 por lo tanto la constante c es 96,45.

Los valores de c y e se reemplazan en la ecuación 5.5 y se obtiene el nuevo valor de la constante.

$$103 = c + e \times \log f$$
$$103 = 96,45 + 8,85 \times \log f$$

Reemplazando el valor constante de la ecuación 5.4 se obtiene la ecuación 5.6, la cual es la expresión final de pérdidas del medio:

$$L_{MEDIO} = 11,39 \log d + 103$$

$$L_{MEDIO} = 96,45 + 8,85 \log f + 11,39 \log d \quad (\text{Ecuación 5.6})$$

La expresión 5.6 es la que vamos a ingresar dentro del simulador, en la figura 5.19.b se puede observar, la manera de introducir la contante de 11,39 con el operador logarítmico y la variable de la distancia, para formar la nueva ecuación de propagación.

En la figura 5.19.b se observa la edición de la variable de la frecuencia, con la constante 8,85 y el operador logarítmico.

The dialog box 'Edición de un nuevo elemento' shows the formula 'Elemento = Constante * Oper1 (Var1) * Oper2'. Under 'Edición de elemento', Operando 1 is 'Logaritmo', Operando 2 is 'Nulo', Constante is '11.39', Exponente 1 is '1', Exponente 2 is '1', Variable 1 is 'Dist (Km)', and Variable 2 is '1'. The 'Elemento Editado' field contains '11.39 * log d'. Buttons for 'Aceptar' and 'Cancelar' are at the bottom.

a. Variable distancia

The dialog box 'Edición de un nuevo elemento' shows the formula 'Elemento = Constante * Oper1 (Var1) * Oper2'. Under 'Edición de elemento', Operando 1 is 'Logaritmo', Operando 2 is 'Nulo', Constante is '8.85', Exponente 1 is '1', Exponente 2 is '1', Variable 1 is 'Frec (MHz)', and Variable 2 is '1'. The 'Elemento Editado' field contains '8.85 * log f'. Buttons for 'Aceptar' and 'Cancelar' are at the bottom.

b. Variable frecuencia

Figura 5.19. Edición de un nuevo elemento para formar la expresión del modelo matemático

Una vez ingresado los dos valores del modelo de propagación se obtiene la ventana mostrada en la figura 5.20. En la cual se puede verificar que la fórmula se encuentre escrita correctamente y con sus respectivas variables, las cuales serán de gran importancia ya que una vez aceptado este modelo, las variables podrán ser modificadas por el usuario, de acuerdo al requerimiento del sistema. Se podrá editar el modelo si el resultado no es positivo, en tal caso hay que cambiar las constantes en el programa MATLAB, realizando un nuevo ajuste de la expresión.

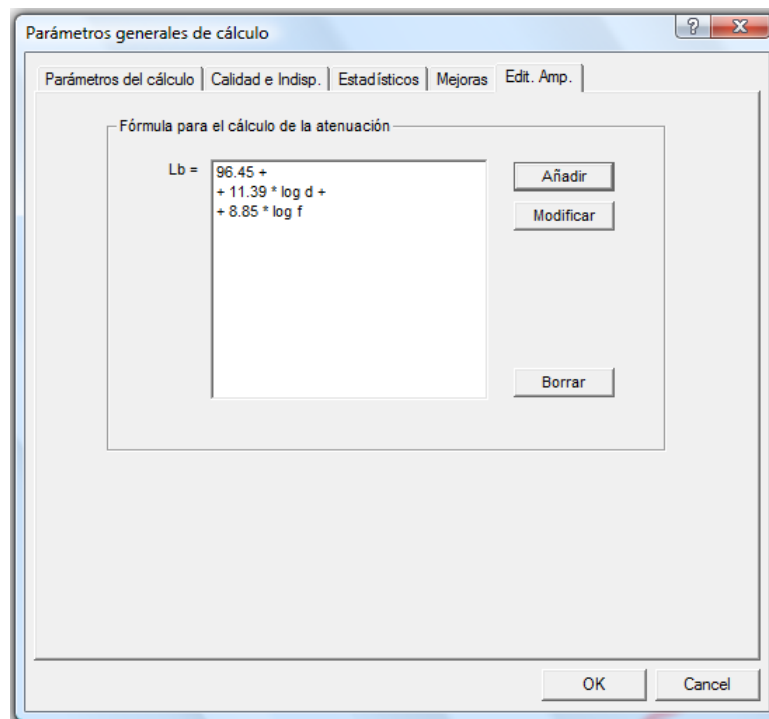




Figura 5.20. Fórmula para el cálculo de la atenuación

Una vez ingresado los parámetros generales de cobertura se ingresan los valores tanto para la estación transmisora como para la receptora, todos estos valores se pueden resumir en la tabla 5.8 donde se detalla cada uno de los parámetros importantes que deben incluirse en la simulación.

Tabla 5.8. Características de las parámetros de Tx y Rx de la simulación

Estación	Característica	Valor	
Transmisora	Nombre	Estación Base	
	Ubicación	Longitud	78°26'42.71"W
		Latitud	0°18'46.32"S
	Ganancia	7 dBi	
	Pérdidas	2 dBm	
	Modulación	16 QAM	
	Velocidad	10 Mbps	
	MTBF	62500 h	
	MTTR	5 h	
	Tipo de Antena	Omnidireccional	
	Impedancia	50 Ω	
	Potencia umbral	-104 dBm	
	Nombre de la Antena	Onmi_5dBi_380MHz(TETRA)	
	Altura promedio edif.	15 m	
Receptora	Nombre	Estación Suscriptora	
	Tipo de Servicio	WiMAX	
	BER (Tasa de Error de Bit)	-85 dBm	
	Altura promedio Edif.	5 m	
	Nombre de la Antena	Onmi_2dBi_800MHz(UMTS)	
	El resto de parámetros el simulador ajusta la estación Rx como está diseñado la estación Tx		

Luego de ingresar todos los parámetros referentes a la simulación, se verifica si todos los datos están introducidos de manera correcta, con el fin de obtener resultados óptimos. A continuación se determina el área donde se desea obtener la cobertura con el ícono  , con esta herramienta se procede a delimitar dentro del mapa un área geográfica que rodea al campus politécnico por medio un recuadro, en el cual se desea conocer los niveles de potencia que determinan el área de cobertura de la red *WiMAX*. Luego se presiona el icono  que corresponde al cálculo del estudio, por medio de éste se identifica el área de cobertura.

En la figura 5.21 se puede identificar la huella de potencia que deja la estación base y las suscriptoras al simular la cobertura. En la figura se puede identificar que están activas 2 ventanas, la primera corresponde a la cobertura y la otra es el rango de potencia para cada

color. El área tiene diferentes superficies circulares de potencia alrededor de la estación base como se puede identificar en el gráfico mostrado a continuación.

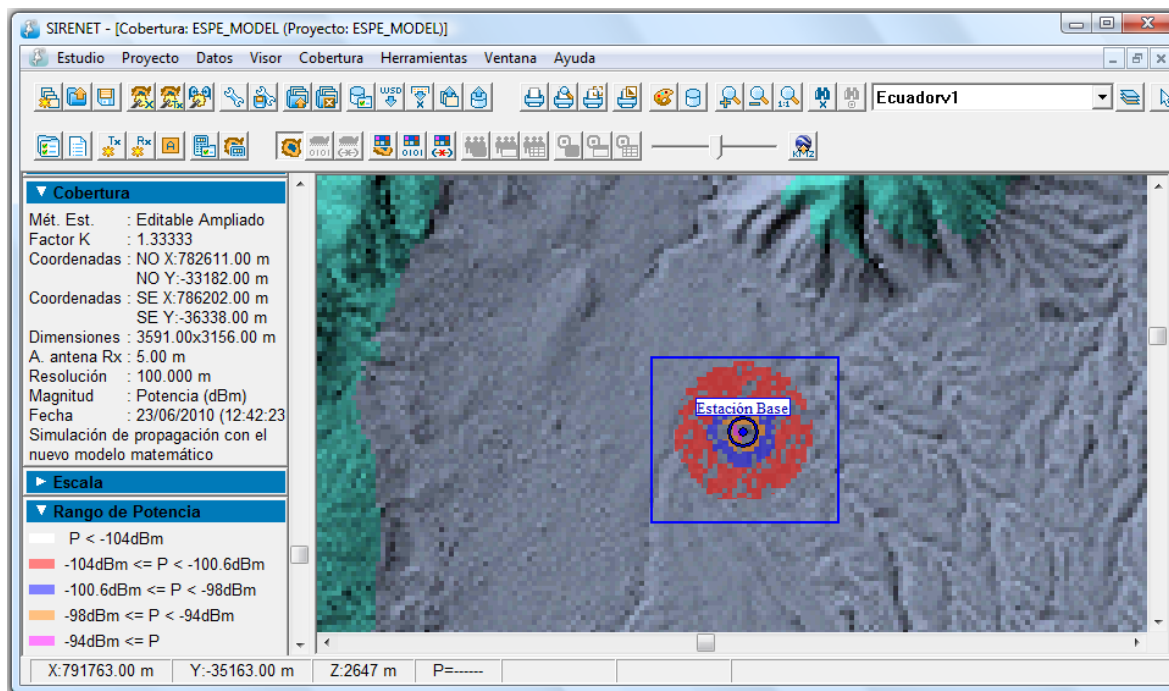


Figura 5.21. Análisis de Cobertura de la Señal WiMAX con el nuevo modelo matemático

Igualmente se puede modificar el rango de la potencia de la señal con los colores: magenta, naranja, azul y rojo. A cada color se le ha designado un rango de potencia, estos valores se pueden identificar en la tabla 5.5, corresponde a los colores del área de cobertura respecto a los rangos de potencia y distancia. Los valores del rango de potencia también se pueden observar en la esquina inferior izquierda de la figura 5.21.

Para tener una panorámica más amplia de los lugares donde puede llegar la cobertura, la herramienta SIRENET tiene la opción de realizar la exportación hacia Google Earth. Este procedimiento se lo puede realizar de manera sencilla. Primero se selecciona la opción Exportar al Google Earth, donde grabamos el archivo con el nombre ESPE_MODEL. De forma automática se abre dicho programa, en el cual se puede identificar la huella de cobertura, así como el nivel de la señal. Se puede identificar el resultado del procedimiento en la figura 5. 22.

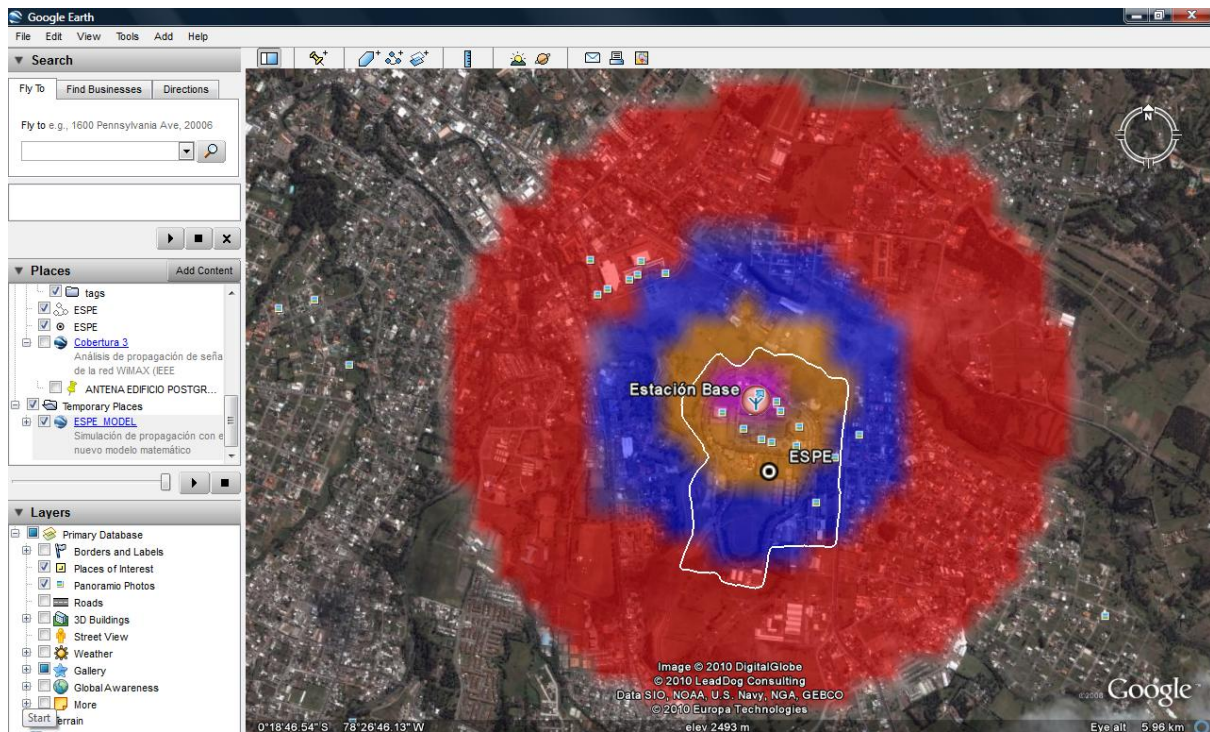



Figura 5.22. Área de cobertura con la herramienta SIRENET en Google Earth

En la gráfica anterior correspondiente al área de cobertura en Google Earth se obtienen cuatro zonas representadas por colores los mismos que dependen de la potencia de recepción que deben tener los equipos para identificar y procesar las señales emitidas por la estación base. Todos estos colores se describieron en un anterior análisis, pero sin embargo cabe recalcar que las zonas con mayor intensidad de potencia son las que están dentro del área de color magenta, naranja y azul. En estas zonas la cobertura de la señal es muy buena y los equipos pueden trabajar de manera eficiente y sin mayor esfuerzo. La superficie de color rojo tiene mayor pérdida de la señal pero igualmente los equipos pueden trabajar en esta zona, pero con mayor esfuerzo ya que la intensidad de la señal se reduce, y en algunos lugares no puede establecerse un buen enlace con la estación base.

Finalmente se realiza un acercamiento del perímetro de la ESPE en el programa Google Earth, de tal manera que se pueda medir la distancia que está cubriendo cada zona. Este procedimiento se lo realiza de manera sencilla mediante el ícono , el mismo que muestra un cuadro con la respectiva distancia en metros.

En la figura 5.23 se puede identificar el modo de obtención de la distancia de cada superficie

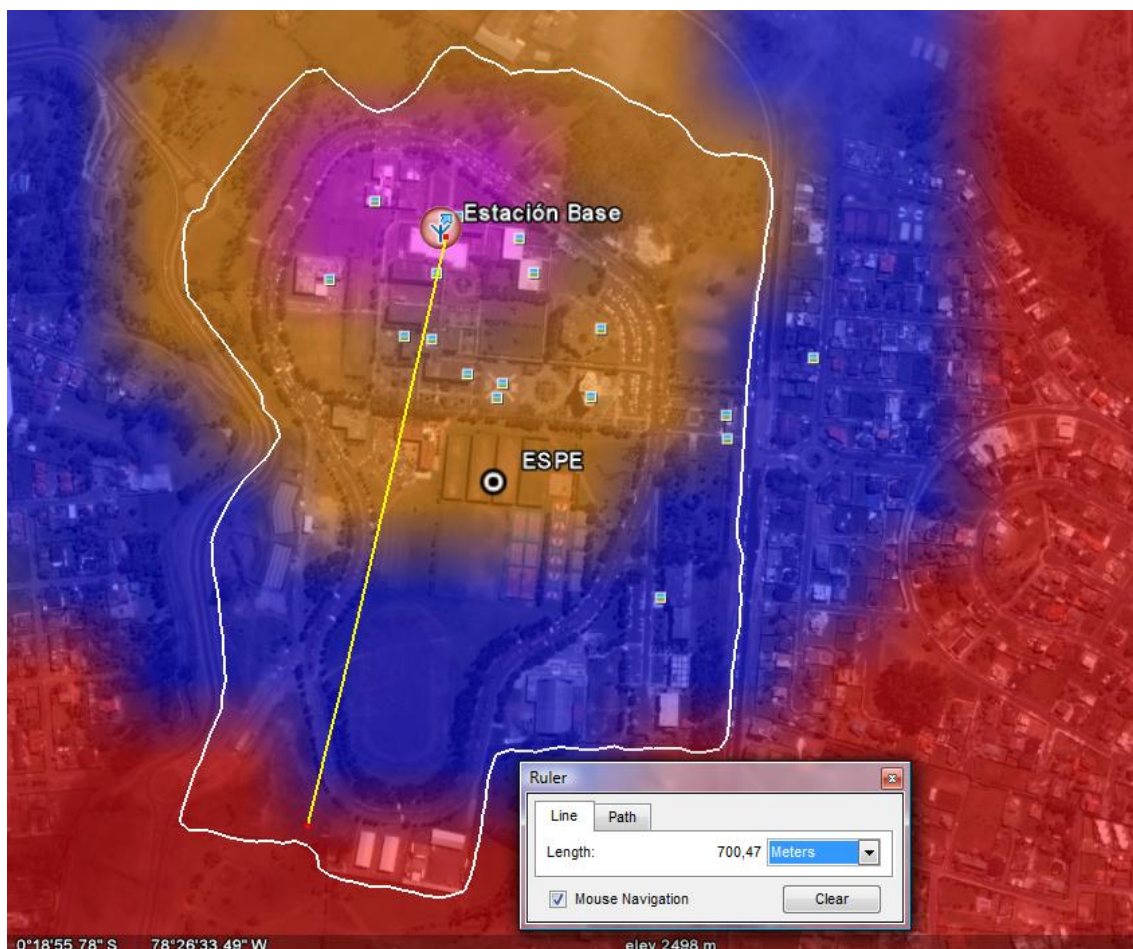


Figura 5.23. Perímetro de la ESPE con cada zona de cobertura

En la figura 5.23 se puede observar el perímetro de la ESPE, el cual está cubierto en su totalidad por las zonas de color magenta, naranja y azul. La zona magenta cubre una superficie de 200 metros, en todo este radio se encuentran los diferentes departamentos de la universidad, donde se van a colocar las estaciones suscriptoras. La zona naranja cubre el campo abierto, las calles y el resto de edificaciones, cubre un área hasta los 400 metros aproximadamente. La zona azul cubre un radio de 700 metros, en esta zona se ubican las canchas, la residencia, la calle entre otras localidades. Hay una parte mínima que está cubierta por la zona en color rojo, la misma que no se toma en cuenta por tener una superficie reducida.

Se puede observar que la cobertura con mayor intensidad cubre en su totalidad el campus de la ESPE. En la universidad se obtiene una excelente cobertura y los equipos pueden trabajar en condiciones favorables para que los usuarios obtengan las señales transmitidas.

5.5.2. Simulación en SIRENET con los diferentes modelos matemáticos de propagación para el estudio de la red *WiMAX*

Finalmente para analizar en su totalidad la cobertura del modelo matemático se realiza las simulaciones de todas las expresiones propias para *WiMAX*, de esta manera se puede identificar como trabajan el resto de modelos bajo las condiciones del entorno de la universidad.

En la figura 5.24 se identifican las diferentes simulaciones del área de cobertura con la herramienta *WiMAX*. La tabla 5.6 es de gran ayuda para desarrollar las diferentes simulaciones, en esta tabla se encuentran las distintas expresiones para cada modelo de propagación. Tanto la variable de frecuencia como la distancia se encuentran en GHz y metros respectivamente. Para obtener cada gráfica se sigue el mismo procedimiento que para el modelo ESPE_MODEL.

En la figura 5.24.a se puede observar que el modelo Espacio Libre tiene más cobertura que el resto de expresiones, esta característica se debe a que en la ecuación no se toma en cuenta ciertos parámetros como correcciones de frecuencia, altura de la antena, el terreno. Además la expresión se utiliza bajo condiciones ideales de propagación de la señal. Se maneja el modelo como referencia importante de pérdidas de señal, ya que es una expresión básica cuando se habla de cobertura. La figura 5.24.a corresponde a la simulación en condiciones ideales.

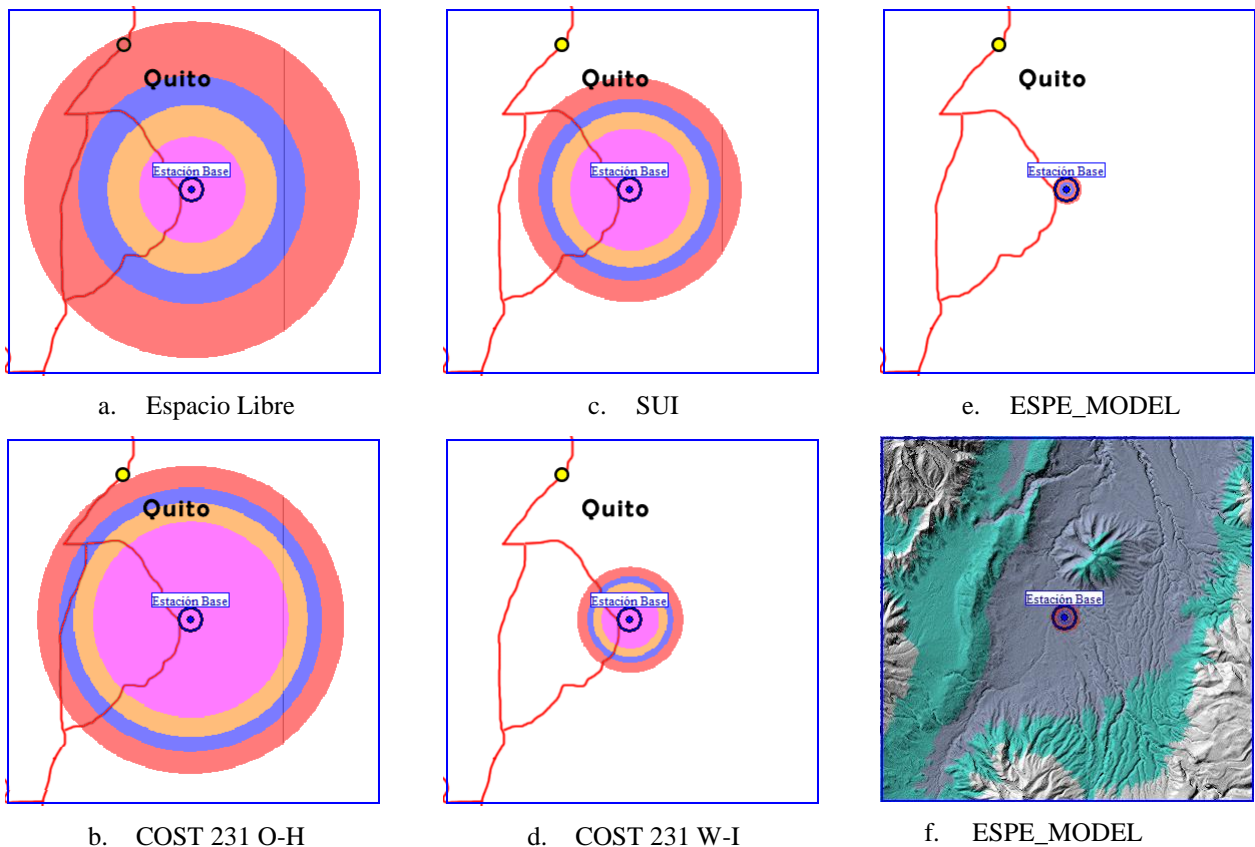


Figura 5.24. Análisis del área de cobertura de los modelos matemáticos para la Red WiMAX con la herramienta SIRENET

La figura 5.24.b corresponde al modelo COST 231 0-H, en esta simulación se observa una cobertura de gran alcance, el modelo se utiliza en frecuencias menores a 3,5 GHz, por lo tanto la simulación no se aproxima a la realidad del sistema ya que la red trabaja a una frecuencia de 5,5 GHz. Sin embargo es necesario acoplar este modelo ya que sirve como base importante para la expresión COST 231 W-I, de tal manera que se obtiene un estudio completo.

La figura 5.24.c y 5.24.d corresponden a la expresión SUI y COST 231 W-I respectivamente. Estas simulaciones se aproximan en su totalidad a la realidad, son utilizadas frecuentemente para simular redes WiMAX bajo las condiciones del Campus Universitario. En la primera se toma en cuenta ciertas correcciones de frecuencia, altura, terreno entre otras, las cuales cambian el comportamiento de la red. El gráfico en el que se identifica la cobertura

con el modelo COST 231 W-I se aproxima de mejor manera al escenario de la ESPE, se observa menor cobertura que el resto de expresiones ya que se obtiene más factores de pérdidas de señal en esta ecuación, además añade una característica importante ya que toma en cuenta la infraestructura de la Universidad.

La figura 5.25 es de gran ayuda para reforzar el estudio de cobertura de la señal, ya que con la herramienta Google Earth se identifica de mejor manera el Campus Universitario, además se observa el entorno, ambiente e infraestructura del escenario donde se realiza el análisis.

A continuación se puede observar la figura 5.25 correspondiente al análisis de cobertura de los modelos matemáticos con la herramienta Google Earth.

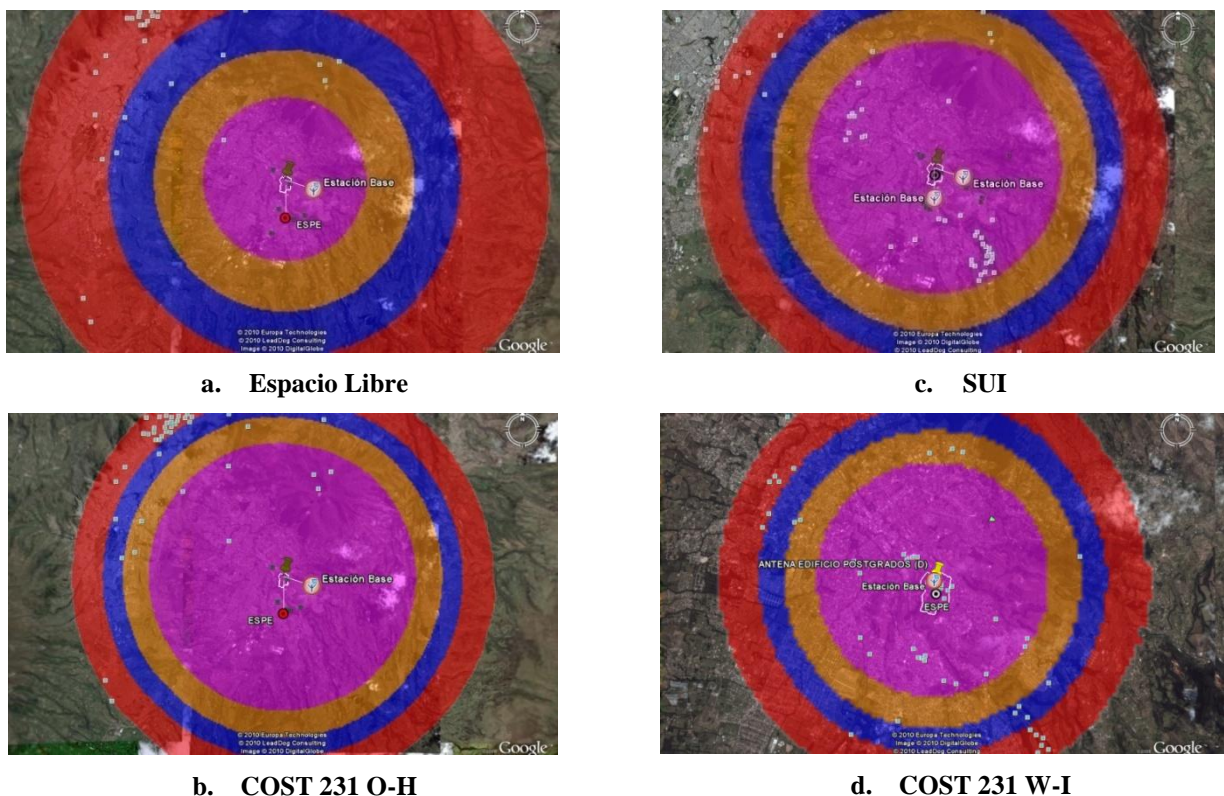


Figura 5.25. Análisis del área de cobertura de los modelos matemáticos con la herramienta Google Earth

Las primeras simulaciones que corresponden a los modelos Espacio Libre y COST 231 Okumura-Hata tienen coberturas excelentes que pueden llegar hasta la ciudad de Quito, lamentablemente no se acopla a la realidad ya que están fuera de los parámetros y características de cobertura. En la primera se tiene un límite de señal de 15,5 Km y los enlaces con mayor potencia están dentro de los 10,5 Km. En la simulación con COST 231 O-H se obtiene un límite de 14,1 Km y las mejores coberturas están dentro de los 12,1 Km.

Las simulaciones que se aproximan a la realidad son tanto para SUI y para COST 231 W-I, en la primera se obtiene un límite de señal a los 12,25 Km pero las mejores potencias de transmisión se identifican dentro de los 8,4 Km. Para COST 231 W-I el límite se encuentra a los 4,85 Km y las señales con mayor potencia están dentro de los 4 Km. Esta última se aproxima más a la realidad ya que el cambio de rango de cobertura de color rosado a naranja se da a los 2 Km que aproximadamente es el límite del modelo ESPE_MODEL. Hay que tomar en cuenta que la cobertura para el modelo ESPE_MODEL puede variar si en la simulación se cambia el valor constante del operador de la frecuencia, como ya se mencionó antes. Este es un factor muy importante para que la cobertura cambie. El valor para esta constante se determinó realizando un análisis comparativo de la distancia tomada de la tabla 5.5 con la simulación.

Finalmente se puede mencionar que tanto el modelo SUI como el COST 231 W-I son expresiones utilizadas para redes WiMAX. Pero en condiciones similares al entorno universitario el modelo ESPE_MODEL es el más eficaz y eficiente.

5.6. Elaboración de un mapa de la ESPE con la utilización de la herramienta ArcGIS

En esta parte del capítulo se presenta tres mapas interactivos con los datos de propagación de la señal. El primer mapa resulta de las medidas reales tomadas en todo el campus politécnico de la universidad, en el mismo se puede identificar la huella de cobertura que dejan los diferentes rangos de potencia.

En el segundo mapa se presenta un análisis del modelo de propagación ESPE_MODEL que se encontró a partir de la herramienta *curve fitting* de MATLAB. En este se puede observar la huella de cobertura representada por colores para el modelo real del sistema WiMAX. El mapa tiene que ser muy parecido al primer plano ya que el modelo se aproxima a la realidad.

En el último mapa se puede identificar de manera sencilla la gráfica de la medida tomada en cada uno de los 184 puntos y además se identifica la figura del espectro de potencia de recepción de la señal en la antena de la radio base. Este es un plano interactivo, por esta razón al colocar el puntero sobre cada punto este realiza un vínculo con el gráfico propio de cada localidad.

De esta manera se aportará a la Universidad con los mapas interactivos donde se mostrará la huella de cobertura real, y del modelo ESPE_MODEL donde se publicará las zonas con mayor y menor intensidad de la señal. La información digitalizada del mapa se podría presentar en un futuro en la página web de la Universidad para que los estudiantes, profesores, administrativos y usuarios en general conozcan la cobertura de la red y de esta manera predeterminen el nivel de acceso que dispondrán de la misma dependiendo el sitio en el cual se encuentren dentro del Campus.

5.6.1. Diseño del mapa interactivo de propagación

Este análisis de todo el campus de la ESPE permitirá determinar los puntos donde existe mayor intensidad de potencia. De esta manera se identifica donde se pueden colocar las estaciones suscriptoras para que se pueda establecer un enlace totalmente satisfactorio. Para la construcción del mapa interactivo es necesario utilizar la tabla referente a los niveles de potencia de recepción de la señal de los 184 puntos más el dato de la intensidad de potencia de la antena, esta información se encuentra en la tabla resumida 5.9. En la cual se muestra las coordenadas en X y Y para cada punto. Se detalla también tanto la potencia de recepción como la potencia del modelo RX_MODEL.

Tabla 5.9. Información de la Potencia Rx y del Modelo ESPE_MODEL para el programa ArcGIS

ID	PUNTO	COORDENADAS		POTENCIA Rx	POTENCIA Rx RX_MODEL
		X	Y		
1	P.0	784403,7	9965380	-83,27333333	-89,13614274
16	P.15	784567,5	9965496	-97,62	-87,71309053
17	P.16	784414,6	9965427	-92,80111111	-85,70741109
18	P.17	784456,3	9965470	-93,49	-90,23994779
19	P.18	784498,8	9965512	-95,63555556	-87,71309053
30	P.29	784360,4	9965402	-88,45444444	-89,13614274
31	P.30	784337,1	9965488	-95,27666667	-90,23994779
144	P.143	784619,5	9965234	-88,95111111	-100,6482876
156	P.155	784439,8	9965380	-100,88	-94,96649422
166	P.165	784607,2	9964922	-102,1266667	-100,2724146
176	P.175	784507,5	9965024	-100,6155556	-96,57623327
177	P.176	784412	9965015	-99,17777778	-99,42233769
178	P.177	784569,2	9965110	-100,5844444	-101,4280171
179	P.178	784407	9965105	-101,49	-96,57623327

La información que se presenta en la tabla 5.9 se exporta a un formato de almacenamiento de datos (dbf) que reconoce el programa ArcGIS para que mediante un procedimiento geo-estadístico interpole esos datos y se construya regiones de cobertura real y del modelo. El procedimiento que se sigue para identificar los mapas con la utilización de la herramienta ArcGIS esta detallado en el Anexo 3 del presente estudio de propagación.

Mapa de Cobertura con las medidas reales

Este mapa mostrará la intensidad de potencia real en toda la superficie de la ESPE. En la figura 5.26 se observa dicha cobertura con los distintos colores para cada zona dependiendo de los niveles de potencia.

En la tabla 5.5 que se describió anteriormente, se puede observar los colores del área de cobertura respecto a los rangos de Potencia y distancia, se utiliza los mismos parámetros para analizar este nuevo mapa ya que hay que seguir un mismo estándar de cobertura, de esta

manera la especificación para cada color queda establecida como parte del modelo matemático para el sistema de comunicación WiMAX.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL AREA DE COBERTURA DE RECEPCION DE POTENCIA DE LAS MEDIDAS REALES TOMADAS EN EL CAMPO CON EL ANALIZADOR DE ESPECTROS "ANRITSU" "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED CON TECNOLOGÍA WIMAX (IEEE 802.16 -2004) PARA EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE"

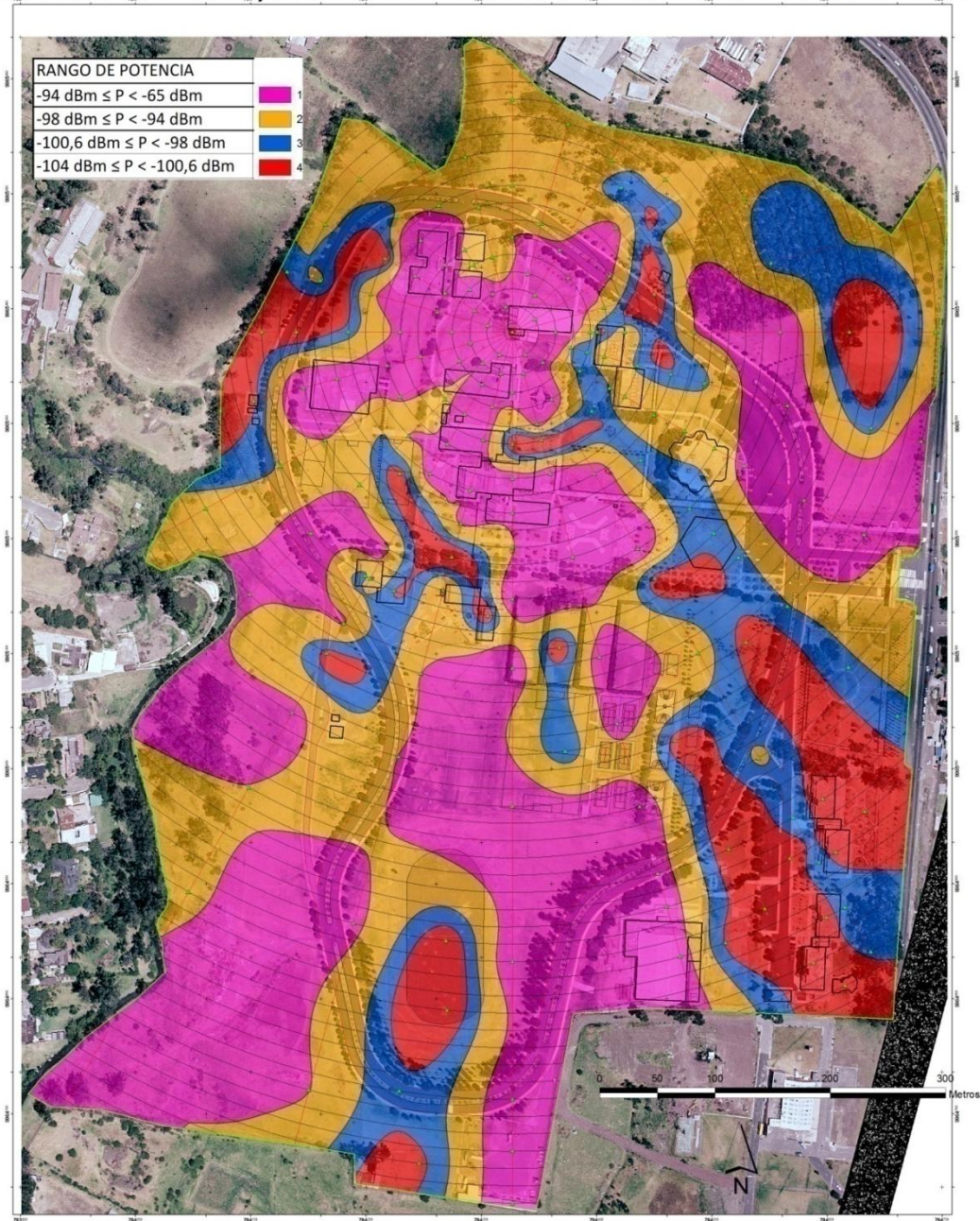


Figura 5.26. Mapa de Cobertura con las medidas reales

Mapa de Cobertura con el modelo ESPE_MODEL

El modelo de canal de ESPE_MODEL que se encontró a través de todo un proceso de predicción de expresiones matemáticas, fue seleccionado para el diseño, desarrollo y ensayo de la tecnología *WiMAX* en todo el perímetro de la ESPE mediante el uso de una herramienta geo-espacial muy importante ARCGIS. Usando el modelo de propagación, es posible entonces predecir de manera más precisa las probabilidades de cobertura que pueden ser logradas dentro de un sector correspondiente a una radio base. En el caso de la Universidad es preciso que la cobertura establecida por el modelo se encuentre en sus máximos valores en todo el Campus Politécnico. La probabilidad de cobertura evaluada puede ser usada además para planificación. Por ejemplo puede ser usada para determinar el número de estaciones bases necesarias para proveer servicio a una determinada área geográfica. El análisis con el modelo no reemplaza la planificación detallada del lugar, pero puede proveer una estimación exacta y casi real de los sucesos que se puedan dar a futuro en la ESPE y en entornos parecidos a la universidad. [32]

En la figura 5.27 se puede identificar el mapa de cobertura que mostrará la intensidad de potencia en toda el área de la Escuela Politécnica del Ejército. Se puede analizar que mediante el desarrollo de los mapas, se identifica si existe el concepto de disponibilidad de cobertura en un determinado punto de la Universidad. El área de cobertura permite optimizar el enlace bajo cualquier circunstancia, las cuales se han mencionado en los incisos anteriores. Los colores para cada área de cobertura se pueden identificar en la tabla 5.5.

**REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL AREA DE COBERTURA DE RECEPCIÓN DE POTENCIA DEL MODELO ESPE_MODEL
"DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED CON TECNOLOGÍA WIMAX
(IEEE 802.16 -2004) PARA EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE"**



Figura 5.27. Mapa de Cobertura con el modelo ESPE_MODEL

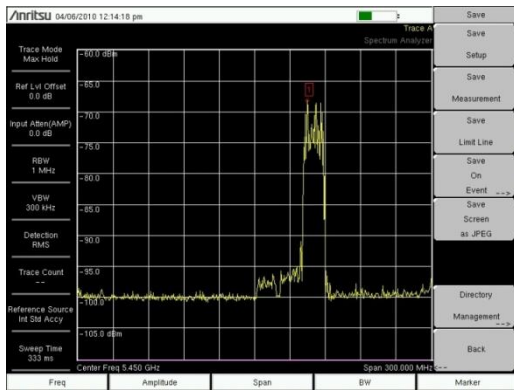
Mapa de fotografías de las 185 señales de propagación de potencia

La contribución de las graficas de potencia al estudio de propagación se puede analizar desde el punto de vista de los resultados del rendimiento alcanzable con la red *WiMAX* implementada en la ESPE. Mediante las fotografías se puede identificar el funcionamiento del equipo central de propagación de la señal, la radio base, la figura da una representación diagramática de cada uno de los puntos que se escogieron para analizar su potencia.

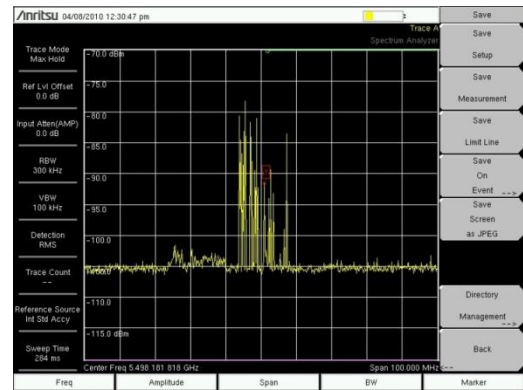
La selección de estas localidades tiene una razón importante en el estudio por lo tanto es necesario la visualización de la intensidad de potencia en función de la frecuencia. Cada punto seleccionado es estratégico para investigar la cobertura de la señal y el modelo ESPE_MODEL. Mediante el análisis completo se puede detectar las implicaciones LOS y NLOS de la estaciones base.

En la figura 5.28 se puede observar la descripción de la de la información disponible en el mapa elaborado.

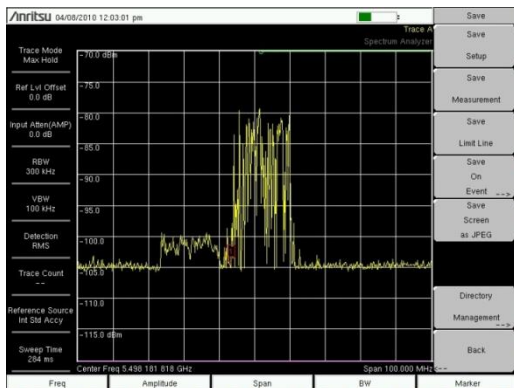
Los 185 puntos están identificados en el mapa con números representados desde el 0 correspondiente al primer punto hasta el 184 que corresponde a la última localidad. Igualmente a cada espacio de análisis de la señal le concierne una grafica de potencia e información de la misma.



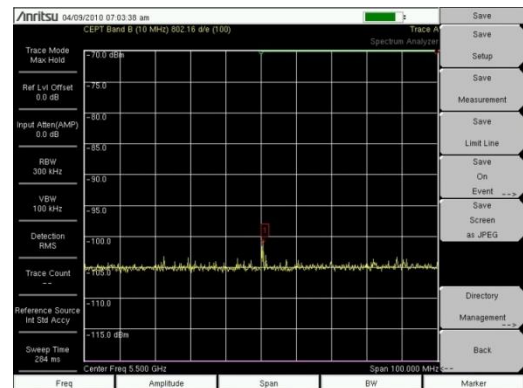
a. Potencia de la Antena



c. Potencia del Punto 29



b. Potencia del Punto 48



d. Potencia del Punto 54

Figura 5.28. Descripción de la de la información disponible en el mapa elaborado

Las gráficas más importantes de propagación de la señal *WiMAX* para construir el mapa, esta detallado en el Anexo 4 del presente estudio de propagación.

En la figura 5.29 se puede identificar el mapa de la ESPE con todos los puntos donde se encuentra la información de las fotografías de potencia, la imagen de la universidad corresponde al nivel de señal en todo el entorno.

**REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS MEDIDAS REALES TOMADAS
EN EL CAMPO CON EL ANALIZADOR DE ESPECTROS "ANRITSU"
"DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED CON TECNOLOGÍA WIMAX
(IEEE 802.16 -2004) PARA EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE"**



Figura 5.29. Mapa de fotografías de la antena y los 184 puntos seleccionados para el análisis de cobertura

5.6.2. Análisis de los mapas de cobertura y del mapa de la información de las fotografías

Con el análisis integrado de cobertura que se presentó anteriormente se puede llegar a la conclusión que tanto el modelo ESPE_MODEL como las medidas reales en el campo permiten alcanzar cifras de capacidad y cobertura muy poderosas, se habla de aproximadamente -68 dBm hasta -102 dBm en todo el Campus Universitario. En la práctica, o en otras palabras en la realidad, existe una diferencia mínima de decimas en los puntos seleccionados. En condiciones LOS, el rango de cobertura es dependiente de la obtención del radio de línea de vista y la fórmula del modelo funciona de la misma manera. En condiciones de NLOS existe el concepto de disponibilidad de cobertura, hay que situarse hasta a 1 Km aproximadamente, en estas condiciones se recepta la señal de manera óptima. La propiedad de conseguir un funcionamiento eficaz en la universidad tiene una gran importancia con respecto a la transmisión de señal de la antena, ya que posibilita tener los equipos suscriptores (CPE) auto-instalables y auto-provisionables en todas las zonas con mayor intensidad de señal.

El entorno de trabajo de las redes inalámbricas se puede observar tanto en el mapa de cobertura con el modelo ESPE_MODEL como con las medidas realizadas en el campo, no existe mayor variación entre el uno y el otro gráfico, por lo tanto en la práctica es necesario escoger cualquier mapa de propagación, para determinar el rango de cobertura en situaciones normales y de interferencia.

Uno de los objetivos importantes que se plantean en el tratamiento del sistema *WiMAX*, es que tanto el mapa de cobertura como el otro sean semejantes ya que el modelo simula la realidad de la red, se cumplió el objetivo principal de la obtención de cobertura, y las diferencias entre estas cartografías son mínimas. En el análisis se determina que las dos tienen las mismas características de cobertura de potencia, y siguen los mismos parámetros en las zonas para determinar la intensidad de la señal. La estandarización de los parámetros de potencia en los dos mapas permitirá a los administradores de la red, desarrollar aplicaciones específicas para predicciones de sistemas *WiMAX* y de los enlaces con las demás estaciones suscriptoras.

5.7. Validez del modelo matemático de propagación

En el proceso de desarrollo del proyecto se identificó que existe un sin número de modelos, en su mayoría no se adaptan al tipo de red que se está tratando. Por lo tanto queda claro que existen muchas teorías y tipos de expresiones de propagación, lo que puede dar lugar a que para un único fenómeno se puedan plantear diferentes modelos. Para definir si un modelo es correcto se pueden usar varios factores, entre los más importantes están los que se mencionan a continuación:

- El modelo puede explicar las observaciones realizadas del fenómeno.
- Se puede usar el modelo para predecir el comportamiento del fenómeno modelado.
- El modelo es consistente con otras ideas acerca del funcionamiento del fenómeno modelado.

En primer lugar, de un modelo no se dice si es correcto, si no que se dice que es *acceptable*. La aceptabilidad del modelo se basa en su capacidad de cumplir los tres factores expuestos anteriormente: explicar, predecir y ser consistente con otros conocimientos. [33]

En segundo lugar, puede haber más de un modelo que sea una explicación admisible para el mismo fenómeno. No siempre es posible ni deseable elegir un único modelo como *acceptable*.

Los modelos tampoco son inamovibles. Es frecuente que, con el aumento de observaciones del fenómeno, se cambien los modelos y aparezcan otros más aceptables capaces de explicar más casos de comportamiento que puedan predecirlos mejor o que sean más consistentes con otros tipos de conocimientos.

De ésta manera se puede describir un análisis positivo de las expresiones que se desarrolló en este proyecto. Principalmente se puede decir que el modelo que se encontró se

considera aceptable, en base a lo bien que el mismo puede explicar y predecir comportamientos de propagación de la potencia en función de la distancia. Se puede identificar esta hipótesis en las diferentes simulaciones que fueron realizadas con las herramientas: SIRENET y ARCGIS.

El modelo ESPE_MODEL de propagación para tecnología *WiMAX* es una representación simplificada de la realidad por medio de un conjunto de restricciones e hipótesis. Se habla de restricciones ya que en un determinado punto del análisis para encontrar el modelo, se excluyó ciertos puntos los cuales desentonaban con la curva logarítmica.

También se identificó un resultado positivo en base al tercer factor, el cual describe que el modelo es consistente si se aproxima a las ideas de otros autores acerca del funcionamiento del fenómeno. Cuando se comparó el modelo desarrollado con otras expresiones de propagación, se concluyó que el modelo ESPE_MODEL tiene una breve similitud con otras principalmente en la manera a la que se adapta la curva la cual es logarítmica. Las otras expresiones se identificaron bajo características que se ajustan al entorno de la universidad, y tanto el modelo ESPE_MODEL como los otros modelos toman en cuenta características propias de propagación como ambiente, obstrucciones, difracción, distorsión, interferencias entre otros fenómenos. Por tanto el modelo que se encontró se considera consistente con otros conocimientos contrastados por algunos autores en base al fenómeno de propagación de la señal.

Se determina en este estudio que el modelo identificado se puede usar constantemente en un futuro para responder cuestiones acerca de determinados fenómenos, esto quiere decir que cuando se obtienen nuevos datos de potencia en el entorno universitario estos son susceptibles de ser revisados o descartados.

Finalmente los modelos son propuestas que utilizan los científicos para explicar patrones de comportamiento que se observan en el mundo real. Esta particularidad importante se identificó en el presente proyecto.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Se han revisado diferentes tipos de construcción de modelos y se han presentado varias ecuaciones de propagación las cuales son idóneas en la banda de frecuencia y redes inalámbricas con la cual se está trabajando. Estas expresiones mostradas aportan para la generación de nuevos modelos bajo la misma técnica de construcción de esta manera ayudaron a hallar la mejor metodología para obtener la expresión inalámbrica propia para el Campus Politécnico.

Se realizó un estudio para identificar los mejores dispositivos para realizar el análisis de propagación en la Universidad, de esta manera se encontró el mejor dispositivo para medir la señal de potencia que se adapta a las características de la red ya que trabajaba en la banda de frecuencia de la tecnología inalámbrica de la ESPE. Igualmente se seleccionó un dispositivo de ubicación geográfica (GPS) y herramientas de cálculo, de esta manera se obtiene resultados precisos y eficientes que permiten el desarrollo del diseño del modelo.

Se analizaron todos los parámetros de propagación tales como frecuencia de operación, atenuación, pérdidas y todos aquellos que intervienen en el enlace inalámbrico ya que hay que tomar en cuenta que los dispositivos de medición y en general los equipos que forman parte del sistema inalámbrico se encuentren bajo las condiciones de la red. La correcta manipulación de estas características en los dispositivos ayudó a obtener datos precisos y no alterados, y de esta forma realizar el procesamiento de la información.

Se investigó el proceso de recolección de información y de esta manera se determinó que en la ESPE es indispensable tomar 9 medidas de potencia por cada punto, el número de mediciones que se deben efectuar se investigó luego de realizar el cálculo de dispersión en puntos críticos y con la fórmula respectiva. Con este procedimiento se obtuvo como resultado un error mínimo en los datos, los cuales son menores al 5 % de dispersión.

Se realizó un análisis de toda la información obtenida en el campo para finalmente validar cada uno de los datos. En el desarrollo del modelo se excluyeron algunos puntos, los cuales son lecturas dispersas, y que no cumplen con las características de propagación de potencia. Se realiza este procedimiento para efectuar el ajuste del modelo a una curva logarítmica de manera efectiva.

Se estudió el comportamiento del modelo en un simulador de redes y una herramienta de cálculo y se realizó un análisis comparativo con el resto de modelos matemáticos de propagación, de tal manera que se concluye que el modelo ESPE_MODEL se aproxima en su forma logarítmica a otros modelos de diferentes autores por tal motivo se valida la efectividad del modelo a futuras predicciones de propagación de la señal en entornos similares al Campus Universitario. El modelo ESPE_MODEL tiene un porcentaje de error respecto a los valores reales medidos en el campus universitario menor al 5%. Lo cual indica la efectividad de la expresión logarítmica.

Por medio del simulador de red SIRENET se encontró una nueva expresión de propagación en función de la frecuencia y distancia. En el procedimiento se realizó ajustes en las constantes de la curva y se desarrollo otra expresión que se ajusta de mejor manera a la red WiMAX de la ESPE ya que está compuesta de dos variables. El modelo en función de la distancia y potencia es exactamente igual al modelo en función de la distancia solamente.

Se realizó un mapa en ArcGIS con los datos reales y otro mapa con los datos que nos proporciona el modelo ESPE_MODEL. El resultado en los dos mapas son similares, y la coloración en función de la intensidad de potencia es muy parecida, a diferencia de zonas

como el bosque, o puntos lejanos a la antena de la radio base, donde se obtienen pérdidas superiores. Esta característica de pérdidas en la señal de recepción se pudo observar en el mapa con los datos medidos en el campo con el analizador de espectros, el mismo que proporciona información más real del comportamiento de la red en cada zona. Este análisis de todo el Campus de la ESPE, permitirá determinar los puntos donde existe mayor intensidad de potencia. De esta manera identificar donde se pueden colocar las estaciones suscriptoras a futuro para que se pueda establecer un enlace totalmente satisfactorio.

El análisis comparativo entre las demás expresiones dio un resultado favorable para validar la ecuación propuesta en el presente estudio ya que la misma se aproxima más a los datos obtenidos en cualquier punto de la universidad. Con el análisis de las medidas se pudo observar que la universidad se encuentra dentro de un nivel óptimo de cobertura, con una intensidad superior de potencia necesaria para apoyar las comunicaciones de voz y banda ancha inalámbrica orientada a los datos y video.

Finalmente se dio un resultado óptimo del modelo matemático de propagación de la red *WiMAX* con el que se puede pronosticar la cobertura en redes inalámbricas en un entorno exacto de la Universidad, con ciertas restricciones como zonas donde existe vegetación o edificaciones en campos lejanos a la radio base.

6.2. Recomendaciones

Al momento de realizar las medidas con el analizador de espectros, es importante visualizar que no existan otras antenas o señales que estén trabajando en la misma banda de frecuencia. Se recomienda seguir un procedimiento adecuado para que no existan interferencias por parte de otras estaciones. Primero se debe apagar la radio base en su totalidad, luego con el equipo de medición tratar de receptar una señal en esta banda de 5,5 GHz alrededor de todo el campus de la ESPE, de tal manera que si existe algún dispositivo o estación que trabaje en esta banda, al momento de tomar las medidas apagar dichos equipos para que no exista distorsión e interferencias de la señal de potencia con otros espectros.

Cabe recalcar en cuanto a la cobertura de la señal receptada por el dispositivo de medición que es recomendable crear mapas interactivos con esta información donde se identifiquen las zonas con mayor y menor potencia de señal. De esta manera se mostrará la huella de cobertura real, con los niveles establecidos de potencia para cada zona. La información digitalizada del mapa se podría presentar en la página web de la Universidad para que los estudiantes, profesores, administrativos y usuarios en general conozcan la cobertura de la red y de esta manera predeterminen el nivel de acceso a la misma dependiendo el sitio en el cual se encuentren dentro del Campus.

Se recomienda tomar en cuenta nuevas mediciones de potencia, en las zonas exteriores a la universidad, para determinar de esta manera hasta donde llega la cobertura del sistema. Con estos valores se puede hacer un análisis más amplio de la red inalámbrica implementada en la ESPE, y si se obtienen valores óptimos de potencia la Universidad podría estar en la capacidad de dar servicios inalámbricos a sectores aledaños al Campus Politécnico.

Para proyectos posteriores se recomienda realizar el mismo análisis de propagación de la red *WiMAX* pero con un enfoque a las antenas suscriptoras, para identificar el comportamiento de las mismas y analizar las características de propagación de la señal que envía la estación suscriptora hacia la radio base, igualmente observar la cobertura que tiene la misma y de esta manera establecer la distancia máxima a la que se puede colocar la estación con línea de vista y en ausencia de esta.

Finalmente cabe recalcar que en este análisis se determina solamente el modelo matemático en función de la distancia, para proyectos posteriores se debe tomar en cuenta ciertas restricciones tales como obstáculos que pueden causar atenuaciones o pérdidas de la señal de potencia, tales como el bosque, las edificaciones, campo lejano a la antena transmisora, entre otras las cuales son sombras que causan mayor pérdida de propagación. Así de esta forma se puede obtener alteraciones en el modelo ESPE_MODEL.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chirino, Orlando, La propagación de las ondas, <http://www.radioaficionados.info/propagacion2.html>, 11 de enero del 2010.
- [2] Rincón, David, “Mitigación de la Dependencia a Largo Plazo del Tráfico en Redes WLAN IEEE 802.11”, *Revista IEEE America Latina*, 5, 128-125, 12 noviembre 2007.
- [3] Conceptos generales para el rediseño de redes inalámbricas, <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/1339/4/T%2011209%20CAPITULO%202.pdf>, 15 de enero del 2010.
- [4] García, J. C., Desempeño de Modelos de Propagación en Comunicación Móvil para la zona de Caldas Parte 1: Modelos para áreas urbanas, <http://www.docentes.unal.edu.co/jcgarciaa/docs/Papers/ID016.pdf>, 15 de enero del 2010.
- [5] Sallent, Oriol, *Principios de comunicaciones móviles*, Primera edición, Edicions UPS, Barcelona, septiembre 2003.
- [6] Wagemakers, Alexandre, Modelos de Propagación electromagnética Propagación en entorno urbano, http://www.escet.urjc.es/~fisica/personal/alexandre/docencia/mpe_tema3.pdf, 29 de octubre de 2007, 10 de abril 2010.
- [7] IEEE, Análisis y Aplicación de sistemas WiMAX Multicelda, <http://arantxa.ii.uam.es/~aaguiar/Master/Sistemas%20Avanzados/TEMAS/WiMAX%20Multicelda%2013%2001%202010.pdf>, 11 de mayo 2010.

- [8] Modelos de propagación Capítulo 5 http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/capitulo5.pdf, 10 junio de 2010.
- [9] Modelos de propagación <http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/6/67/AnexoCDE-Marcomun.pdf>, 13 de junio 2010.
- [10] Galvis, Alexander, Modelos de canal inalámbrico y su aplicación al diseño de redes WiMAX, <http://www.scribd.com/doc/6576195/Modelos-Canal-Inalmabrico-Wimax>, 13 de Mayo 2010.
- [11] Mendoza, Manuel, Proyecto de Investigación Modelo de Propagación de Ondas Electromagnéticas para la Ciudad de Santo Domingo a una Frecuencia de 1.9 GHz, Agosto 2007, 3 de Abril 2010, <http://www.laccei.org/LACCEI2009-Venezuela/p229.pdf>
- [12] Propagación de ondas electromagnéticas, <http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/6/67/AnexoCDE-Marcomun.pdf>, 10 de julio 2010.
- [13] Propagación de Señales, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/vila_b_ca/capitulo1.pdf, 10 julio 2010.
- [14] The ns Manual, www.ecse.rpi.edu/Homepages/shivkuma/teaching/fall2002/ns-2/ns_doc.pdf, 10 de marzo del 2008, 15 de abril 20010.
- [15] IEEE 802.16 Working Group, Interim Channel Models for G2 MMDS Fixed Wireless Applications, *Revista ST*, 8, 35-43, enero 2010.
- [16] Recomendación UIT-R P.840-3. Atenuación debida a las nubes y a la niebla, <http://courses.ece.ubc.ca/571p/priv/R-REC-P.840-3-199910-I!!PDF-E.pdf>, 15 de abril 2010.

- [17] Primera solución integral para el análisis de redes móviles WiMAX™ WIRELESS TECHNOLOGIES, [http://www.rohde-schwarz.com/www/la_cont.nsf/file/NEWS%20197_s_ROMES.pdf/\\$file/NEWS%20197_s_ROMES.pdf](http://www.rohde-schwarz.com/www/la_cont.nsf/file/NEWS%20197_s_ROMES.pdf/$file/NEWS%20197_s_ROMES.pdf), 16 de abril 2010.
- [18] Nuevo escáner universal de telefonía móvil para el despliegue y la optimización de redes WiMAX, <http://www.diarioelectronico hoy.com/nuevo-escaner-universal-de-telefonía-movil-para-el-despliegue-y-la-optimización-de-redes-wimax/>, 31 Marzo del 2009, 18 abril 2010.
- [19] Computadora de mano Vector Network Analyzer - AVN Master. http://translate.google.com/ec/translate?hl=es&langpair=en%7Ces&u=http://www.us.anritsu.com/products/Test-and-Measurement-Solutions/RF-and-Microwave-Solutions/Handheld-Vector-Network-Analyzer--VNA-Master_ARPC2064ARPC.aspx, 18 de abril 2010.
- [20] VNA MASTER, http://www.us.anritsu.com/products/MS2036A_VNA-Master_ARSPG_ARQQSidZ806.aspx, 18 de abril 2010.
- [21] Analizadores de Espectros de RF, http://www.idm-instrumentos.es/Telecomunicacion_RF/analizador_espectros_3GHz.htm, 18 de abril 2010.
- [22] GPS Trimble JUNO SC, http://www.topografia-global.com/catalogo/gps/simplef/t_junost.html, 19 de abril 2010.
- [23] Curso de ArcView 8.x Lic. Maynor Beltetón, <http://www.scribd.com/doc/6601380/Curso-ArcView8>, 9 de junio 2010.
- [24] MATLAB, <http://www.angelfire.com/la/hmolina/matlab1.html>, 9 de junio 2010.
- [25] Caja de herramientas de ajuste de curvas, <http://translate.google.com/ec/translate?hl=es&sl=en&u=http://www.mathworks.com/products/curvefitting/&ei=5gMDTIioD8L88Aao9NmlDQ&sa=X&oi=translate&ct=result&resnum=2>

&ved=0CCYQ7gEwAQ&prev=/search%3Fq%3Dcurve%2Bfitting%2Bmatlab%26hl%3Des%26prmd%3Dv, 10 junio 2010.

[26] Galvis, Alexánder, Modelos de canal inalámbricos y su aplicación al diseño de redes WiMAX, http://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/item/1006/1/modelos_canal_inalmabrico_wimax.PDF, 10 junio 2010.

[27] ARCGIS Conceptos básicos Geoinfo, <http://softwaregis.cl/arcgis.html>, 11 junio 2010.

[28] España Grupo EP, Guía de Instalación ArcGIS Desktop 9.3, http://www.imedea.uib.es/gis/geoportal/doc/Guia_instalacion_ArcGIS.pdf, 11 junio 2010.

[29] Medidas Directas http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/medidas/medidas_directas.htm, 19 de abril 2010

[30] Medidas de Dispersión, http://www.vitutor.net/2/11/medidas_dispersion.html, 19 de abril 2010

[31] Ajuste de curvas, <http://iqc.udg.es/~perico/docencia/QTC/ajustes.pdf>, 10 de junio 2010

[32] Rábanos, Hernando, Parámetros técnicos para redes WiMAX <http://dspace.epn.edu.ec/bitstream/123456789/896/4/T10354CAP3.pdf>, 15 de junio 2010

[33] Modelos de propagación en Interiores – Radiopropagación,
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11761/fichero/Vol%FAmen2%252F11-Cap%EDtulo6+-+Modelos+de+propagaci%F3n+en+interiores.pdf>, 21 de junio 2010

ANEXO 1

TABLA COMPLETA DE INFORMACIÓN DE POTENCIA DE LA SEÑAL

PUNTO	D m	ENTORNO	MEDIDAS EN EL CAMPUS DE LA ESPE									DATOS REALES		DATOS MODELO		% D	% ERROR
			M.1 dBm	M.2 dBm	M.3 dBm	M. 4 dBm	M.5 dBm	M.6 dBm	M.7 dBm	M.8 dBm	M.9 dBm	MEDIA dBm	L _{MEDIO}	POTENCIA Rx	L _{MEDIO}		
ANTENA	1	Edificio L.V. (D)	-70,54	-65,89	-67,87	-70,12	-69,06	-69,98	-63,18	-68,07	-68,46	-68,13	102,25	-68,88	103,00	2,45	0,74
0	60	Edificio L.V. (D)	-87,1	-94,96	-90,51	-82,46	-71,69	-75,1	-84,87	-84,62	-78,15	-83,27	117,39	-89,14	123,25	6,86	4,99
1	15	Edificio S.L.V.	-99,09	-96,14	-93,01	-89,15	-88,9	-89,16	-98,9	-98,96	-98,99	-94,70	128,82	-82,28	116,40	4,36	9,64
2	30	Calle	-97,89	-90,99	-94,38	-88,9	-89,11	-89,66	-99,88	-99,1	-98,9	-94,31	128,43	-85,71	119,82	4,38	6,70
3	45	Edificio L.V.	-85,76	-99,01	-98,79	-89,55	-88,87	-88,66	-102,2	-101,98	-101,92	-95,19	129,31	-87,71	121,83	6,52	5,78
4	15	Campo	-97,36	-86,77	-85,62	-88,67	-89,09	-88,57	-92,33	-93,3	-92,66	-90,49	124,60	-82,28	116,40	3,37	6,59
5	15	Arboles	-103,68	-103,06	-103,56	-102,11	-103,46	-102,92	-102,73	-103,1	-102,9	-103,06	137,17	-82,28	116,40	0,34	15,15
6	105	Limete Campo	-103,52	-96,7	-91,96	-88,68	-88,44	-89,06	-103,6	-104,1	-103,36	-96,60	130,72	-91,90	126,02	6,50	3,59
7	90	Calle	-104,1	-95,41	-99,3	-104,58	-104,36	-103,26	-101,33	-100,88	-102,1	-101,70	135,82	-91,14	125,26	2,16	7,78
8	30	Bosque	-103,54	-99,79	-99,87	-88,82	-89,15	-89,2	-105,89	-106,3	-105,65	-98,69	132,81	-85,71	119,82	6,51	9,78
9	30	Campo	-103,45	-89,68	-91,8	-89,1	-89,15	-88,76	-97,2	-96,9	-97,3	-93,70	127,82	-85,71	119,82	4,75	6,26
10	30	Bosque	-102,76	-99,36	-99,56	-88,85	-88,86	-89,27	-104,1	-103,9	-103,08	-97,75	131,87	-85,71	119,82	5,97	9,13
11	15	Campo S.L.V.	-99,83	-94,28	-93,98	-90	-88,87	-88,76	-99,6	-98,4	-99,87	-94,84	128,96	-82,28	116,40	4,29	9,74
12	15	Edificio L.V. (D)	-88,93	-81,87	-81,08	-82,56	-82,89	-84,76	-96,94	-90,87	-99,19	-87,68	121,79	-82,28	116,40	6,39	4,43
13	90	Calle	-100,5	-92,29	-96,36	-85,8	-88,25	-88,76	-97,71	-97,3	-95,82	-93,64	127,76	-91,14	125,26	4,62	1,96
14	45	Campo-Bosque	-100,28	-98,69	-99,2	-91,12	-91,12	-91,12	-97,4	-97,2	-98,1	-96,03	130,14	-87,71	121,83	3,41	6,39
15	45	Bosque	-102,96	-99,08	-95,92	-88,69	-89,29	-88,84	-104,3	-105,2	-104,3	-97,62	131,74	-87,71	121,83	6,31	7,52
16	30	Campo	-98,26	-87,89	-92,13	-88,33	-89,23	-85,03	-98,33	-98,49	-97,52	-92,80	126,92	-85,71	119,82	5,12	5,59
17	75	Campo	-101,78	-83,88	-93,84	-89,56	-91,12	-89,59	-97,54	-96,9	-97,2	-93,49	127,61	-90,24	124,36	4,71	2,55
18	45	Campo	-103,1	-99,07	-98,23	-88,76	-89,08	-89,47	-96,43	-98,58	-98	-95,64	129,75	-87,71	121,83	4,55	6,11
19	45	Campo S.L.V. (D)	-94,13	-93,35	-94,62	-85,07	-91,25	-91,25	-95,5	-87,56	-86,36	-91,01	125,13	-87,71	121,83	3,43	2,63
20	135	Arbol	-95,91	-86,56	-88,55	-88,68	-89,02	-89,63	-100,73	-100,64	-101,7	-93,49	127,61	-93,15	127,26	5,95	0,27
21	90	Bosque	-103,72	-98,47	-98,94	-88,72	-89,52	-88,93	-99,47	-99,47	-99,02	-96,25	130,37	-91,14	125,26	4,98	3,92
22	120	Campo	-97,02	-89,11	-83,26	-89,36	-88,72	-88,9	-98,5	-95,15	-97,84	-91,98	126,10	-92,56	126,68	4,97	0,46
23	75	Calle	-97,35	-97,2	-98,74	-89,05	-88,62	-89,48	-97,61	-98,12	-98,2	-94,93	129,05	-90,24	124,36	4,13	3,63
24	30	Bosque	-101,06	-99,46	-98,73	-88,45	-88,91	-88,62	-100	-99,34	-98,87	-95,94	130,05	-85,71	119,82	5,06	7,87

PUNTO	D m	ENTORNO	MEDIDAS EN EL CAMPUS DE LA ESPE									DATOS REALES		DATOS MODELO		% D	% ERROR
			M.1 dBm	M.2 dBm	M.3 dBm	M. 4 dBm	M.5 dBm	M.6 dBm	M.7 dBm	M.8 dBm	M.9 dBm	MEDIA dBm	L_MEDIO	POTENCIA Rx	L_MEDIO		
25	300	Arbol	-92,57	-98,59	-95,13	-87,9	-85,3	-89	-99,77	-99,52	-98,91	-94,08	128,19	-97,10	131,21	5,09	2,36
26	60	Arbol	-103,56	-103,99	-102,76	-88,74	-89,18	-89,98	-99,36	-98,87	-99,08	-97,28	131,40	-89,14	123,25	5,47	6,20
27	75	Campo	-99,65	-99,28	-99,35	-89,03	-88,75	-89,04	-99,02	-99	-98,79	-95,77	129,88	-90,24	124,36	4,75	4,26
28	75	Campo	-101,8	-103,4	-102,52	-87,58	-89,3	-88,76	-98,3	-98,7	-99,1	-96,61	130,72	-90,24	124,36	5,56	4,87
29	60	Edificio S.L.V.(D)	-79,32	-85,67	-88,5	-89,2	-84,54	-80,07	-96,38	-96,21	-96,2	-88,45	122,57	-89,14	123,25	6,08	0,56
30	75	Calle	-101,18	-93,44	-105,23	-89,2	-89,29	-88,91	-97,03	-96,76	-96,45	-95,28	129,39	-90,24	124,36	4,73	3,89
31	105	Bosque	-99,32	-99,33	-98,25	-89,09	-89,44	-88,9	-98,5	-98,49	-97,37	-95,41	129,53	-91,90	126,02	4,38	2,71
32	75	Campo S.L.V.	-98,24	-91,9	-87,17	-89,38	-89,74	-87,09	-94,6	-95,01	-93,02	-91,79	125,91	-90,24	124,36	3,34	1,23
33	135	Edificio L.V.(Bi)	-99,37	-93,36	-96,54	-89,32	-89,24	-88,42	-100,3	-100	-101,2	-95,31	129,42	-93,15	127,26	4,87	1,67
34	105	Calle	-103,15	-97,98	-99,31	-89,7	-88,75	-89,5	-97,88	-98,19	-97,22	-95,74	129,86	-91,90	126,02	4,47	2,96
35	660	Bosque	-103,34	-99,54	-99,81	-89,72	-88,9	-89,14	-100,35	-99,98	-100,12	-96,77	130,88	-101,00	135,11	5,18	3,23
36	150	Edificio L.V.(Ele)	-75,12	-94,63	-91,11	-88,64	-89,14	-89,2	-85,65	-88,2	-87,3	-87,67	121,78	-93,67	127,79	3,78	4,93
37	120	Edificio S.L.V.(Bi)	-103,16	-102,94	-103,12	-88,17	-89,16	-89,26	-99,12	-99,4	-98,99	-97,04	131,15	-92,56	126,68	5,61	3,41
38	90	Edificio S.L.V.(El)	-94,98	-94,55	-96,47	-89,24	-88,61	-89,02	-77,69	-77,82	-78,06	-87,38	121,50	-91,14	125,26	7,27	3,09
39	750	Edificio L.V.(Ele)	-80,73	-85,68	-86,37	-89,33	-88,14	-88,77	-77,58	-78,12	-77,82	-83,62	117,73	-101,63	135,75	5,37	15,30
40	225	Campo	-103,17	-99,68	-99,18	-89	-88,92	-89,42	-100	-99,09	-99,55	-96,45	130,56	-95,67	129,79	5,07	0,59
41	60	Arbol	-103,53	-98,84	-99,6	-88,43	-89,41	-89,11	-104,71	-100,45	-104,88	-97,66	131,78	-89,14	123,25	5,92	6,47
42	30	Campo	-83,33	-92,97	-84,36	-83,77	-83,53	-89,32	-75,6	-74,03	-79,36	-82,92	117,04	-85,71	119,82	5,30	2,38
43	45	Edificio S,L,V(El)	-94,25	-93,61	-89,87	-88,56	-88,85	-88,89	-96,7	-96,9	-94,9	-92,50	126,62	-87,71	121,83	3,33	3,78
44	225	Edificio L.V.(Ele)	-96,5	-88,86	-87,06	-88,64	-88,74	-89,34	-88,03	-87,62	-88,32	-89,23	123,35	-95,67	129,79	1,84	5,22
45	705	Campo	-103,59	-99,21	-99,61	-102,51	-102,43	-102,02	-102,91	-102,89	-102,87	-102,00	136,12	-101,32	135,44	1,13	0,50
46	210	Campo-Bosque	-102,08	-98,98	-99,39	-91,62	-91,62	-91,68	-98,95	-98,89	-99,03	-96,92	131,03	-95,33	129,45	3,63	1,21
47	150	Campo S.L.V.	-86,45	-80,16	-83,61	-75,96	-70,77	-72,85	-83,2	-82,6	-81,83	-79,71	113,83	-93,67	127,79	5,45	12,26
48	240	Árbol-Campo	-78,21	-87,99	-81,09	-72,34	-75,64	-75,12	-87,45	-87,31	-88,1	-81,47	115,59	-95,99	130,11	6,81	12,56
49	30	Campo	-98,61	-90,01	-93,79	-88,23	-87,88	-88,78	-102,03	-102,2	-101,85	-94,82	128,94	-85,71	119,82	5,96	7,07
50	75	Calle	-101,01	-99,43	-99,44	-89,13	-88,2	-100,39	-100	-101,2	-100,1	-97,66	131,77	-90,24	124,36	4,09	5,63

PUNTO	D m	ENTORNO	MEDIDAS EN EL CAMPUS DE LA ESPE									DATOS REALES		DATOS MODELO		% D	% ERROR
			M.1 dBm	M.2 dBm	M.3 dBm	M. 4 dBm	M.5 dBm	M.6 dBm	M.7 dBm	M.8 dBm	M.9 dBm	MEDIA dBm	L_MEDIO	POTENCIA Rx	L_MEDIO		
51	30	Bosque	-103,05	-98,74	-99,61	-91,62	-103,62	-91,62	-102,97	-103,36	-103,67	-99,81	133,92	-85,71	119,82	3,93	10,53
52	30	Campo	-93,94	-71,64	-71,14	-82,46	-83,62	-88,6	-95,09	-94	-95,4	-86,21	120,33	-85,71	119,82	9,27	0,42
53	285	Campo	-90,19	-99,24	-99,08	-88,67	-89,03	-89,18	-92,87	-95,43	-93,26	-92,99	127,11	-96,84	130,96	3,59	3,03
54	195	Campo	-100,71	-96,99	-96,47	-90,9	-100,9	-100,9	-101,45	-102,2	-101,8	-99,15	133,26	-94,97	129,08	2,93	3,14
55	210	Calle	-102,48	-99,29	-102,12	-102,07	-102,36	-102,28	-102,32	-102,01	-102,54	-101,94	136,06	-95,33	129,45	0,58	4,86
56	405	Campo-Bosque	-103,26	-99,71	-99,52	-102,27	-102,51	-102,32	-102,86	-103,2	-102,98	-102,07	136,19	-98,58	132,70	1,07	2,56
57	525	Bloque S.L.V.(E)	-94,2	-66,32	-73,13	-88,66	-89,04	-89,49	-88	-85,24	-84,97	-84,34	118,46	-99,87	133,98	7,70	13,11
58	420	Campo-Árbol	-98,01	-88,49	-80,27	-89,79	-88,73	-89,4	-90	-90,4	-89,23	-89,37	123,49	-98,76	132,88	2,67	7,61
59	315	Campo	-102,35	-96,42	-96,59	-89,06	-88,78	-88,64	-90,15	-87,85	-89,78	-92,18	126,30	-97,34	131,46	4,54	4,08
60	225	Edificio L.V.(Mec)	-98,86	-85,91	-86,82	-91,11	-91,44	-98,64	-90,98	-93,24	-91,02	-92,00	126,12	-95,67	129,79	3,56	2,91
61	450	Edificio S.L.V.(Me)	-102,9	-83,45	-82,19	-88,4	-89,68	-89,5	-90,05	-90	-92,74	-89,88	124,00	-99,10	133,22	4,00	7,44
62	90	Gasolinera	-103,1	-99,73	-99,9	-91,74	-102,1	-103,76	-103,34	-99,35	-102,13	-100,57	134,69	-91,14	125,26	2,56	7,00
63	75	Bosque	-103,71	-99,67	-99,52	-103,8	-103,47	-104,46	-102,28	-103,49	-99,78	-102,24	136,36	-90,24	124,36	1,69	8,80
64	135	Campo S.L.V.	-90,66	-84,31	-88,58	-91,46	-89,79	-92,46	-91,12	-95,87	-96,23	-91,16	125,28	-93,15	127,26	2,77	1,58
65	150	Campo	-102,03	-97,72	-94,3	-89,36	-89,36	-89,36	-92,68	-92,93	-91,38	-93,24	127,35	-93,67	127,79	3,42	0,34
66	105	Campo S.L.V.	-103,2	-96,94	-99,19	-89,01	-87,89	-89,82	-93,45	-94,58	-92,67	-94,08	128,20	-91,90	126,02	4,15	1,70
67	285	Calle L.V. (Arboles)	-99,78	-98,96	-98,03	-98,33	-98,33	-98,33	-98,76	-91,46	-97,89	-97,76	131,88	-96,84	130,96	1,43	0,70
68	150	Campo L.V. Arboles	-98,93	-98,82	-97,55	-98,05	-98,05	-98,05	-95,67	-88,46	-95,62	-96,58	130,69	-93,67	127,79	2,30	2,23
69	165	Edificio S.L.V.(E)	-99,75	-89,91	-94,24	-91,42	-90,33	-90,49	-94,94	-96,35	-94,98	-93,60	127,72	-94,14	128,26	2,91	0,42
70	120	Edificio S.L.V.(C-B)	-99,34	-97,55	-97,67	-89,75	-90,57	-90,91	-97,16	-93,67	-97,18	-94,87	128,98	-92,56	126,68	3,41	1,78
71	90	Campo	-100,6	-92,59	-95,08	-92	-83,03	-92,64	-97,23	-98,65	-93,89	-93,97	128,08	-91,14	125,26	3,71	2,21
72	195	Campo	-103,89	-99,56	-99,06	-92,37	-89,66	-90,07	-95,38	-96,2	-90,99	-95,24	129,36	-94,97	129,08	4,17	0,21
73	60	Calle	-103,74	-88,34	-88,72	-88,88	-89,59	-90,1	-94,86	-91,78	-93,19	-92,13	126,25	-89,14	123,25	3,71	2,37
74	45	Campo	-101,16	-98,77	-99,12	-89,58	-89,73	-90,69	-90,2	-89,34	-93,56	-93,57	127,69	-87,71	121,83	4,35	4,59
75	68	Edificio L.V. (E)	-81,38	-93,26	-94,37	-81,2	-80,08	-79,43	-98,56	-91,44	-91,28	-87,89	122,01	-89,72	123,84	7,45	1,50
76	180	Edificio L.V. (C)	-87,32	-90,18	-96,74	-85,11	-87,63	-88,44	-98,77	-95,45	-93,49	-91,46	125,58	-94,57	128,69	4,52	2,48

PUNTO	D m	ENTORNO	MEDIDAS EN EL CAMPUS DE LA ESPE									DATOS REALES		DATOS MODELO		% D	% ERROR
			M.1 dBm	M.2 dBm	M.3 dBm	M. 4 dBm	M.5 dBm	M.6 dBm	M.7 dBm	M.8 dBm	M.9 dBm	MEDIA dBm	L_MEDIO	POTENCIA Rx	L_MEDIO		
77	375	Edificio S.L.V. (E)	-98,11	-88,97	-93,02	-72,41	-90,46	-91,37	-93,28	-98,99	-92,54	-91,02	125,13	-98,20	132,32	5,18	5,74
78	165	Edificio L.V. (B)	-95,02	-89,54	-90,36	-89,81	-92,38	-90,01	-95,56	-99,62	-97,77	-93,34	127,46	-94,14	128,26	3,48	0,63
79	75	Edificio S.L.V. (B)	-98,16	-89,94	-89,02	-84,81	-89,9	-90,48	-93,21	-96,38	-95,85	-91,97	126,09	-90,24	124,36	3,80	1,37
80	65	Campo-Bosque	-100,54	-90,03	-89,93	-88,78	-89,88	-89,28	-98,68	-98,78	-98,74	-93,85	127,97	-89,53	123,65	5,05	3,37
81	360	Edificio L.V. (Geo)	-97,41	-90,16	-89,66	-89,18	-88,37	-89,2	-98,32	-97,77	-98,46	-93,17	127,29	-98,00	132,12	4,60	3,79
82	165	Edificio S.L.V. (Ge)	-97,48	-90,73	-88,82	-91,8	-89,51	-90,27	-98,56	-98,7	-98,76	-93,85	127,96	-94,14	128,26	4,29	0,23
83	75	Campo	-99,92	-89,93	-90,86	-89,3	-89,01	-83,23	-97,41	-98,22	-96,94	-92,76	126,87	-90,24	124,36	5,14	1,98
84	150	Campo	-98,93	-93,62	-89,52	-89,17	-89,06	-90,14	-98,24	-98,77	-98,94	-94,04	128,16	-93,67	127,79	4,42	0,29
85	555	Campo	-101,01	-93,48	-90,04	-89,49	-89,36	-91,86	-99,03	-99,15	-98,91	-94,70	128,82	-100,14	134,26	4,53	4,22
86	105	Edificio L.V. (C)	-75,55	-93,62	-93,29	-89,46	-83,33	-89,58	-99,02	-98,01	-98,25	-91,12	125,24	-91,90	126,02	6,48	0,62
87	120	Edificio S.L.V.(C-B)	-84,73	-93,48	-92,94	-90,16	-89,99	-89,99	-98,86	-98,23	-98,03	-92,93	127,05	-92,56	126,68	4,03	0,29
88	540	Edificio L.V. (B)	-82,05	-94,83	-93,5	-89,6	-89,51	-88,79	-99,12	-97,96	-98,25	-92,62	126,74	-100,00	134,12	4,93	5,82
89	240	Edificio L.V. (Ce)	-94,23	-89,02	-89,31	-89,14	-88,48	-89,54	-97,5	-97,98	-98,27	-92,61	126,72	-95,99	130,11	4,21	2,67
90	90	Campo S.L.V.	-103,2	-89,52	-89,51	-89,05	-89,89	-89,19	-97,39	-97,14	-97,94	-93,65	127,76	-91,14	125,26	5,00	1,96
91	300	Edificio L.V.(Bar)	-102,43	-92,1	-89,98	-88,25	-89,36	-89,31	-97,46	-97,03	-98,31	-93,80	127,92	-97,10	131,21	4,74	2,58
92	360	Campo	-103,45	-89,62	-90,03	-89,56	-89,07	-88,86	-98,42	-98,66	-98,73	-94,04	128,16	-98,00	132,12	5,45	3,09
93	180	Calle	-103,66	-89,77	-89,98	-88,55	-88,99	-88,43	-98,92	-98,58	-98,46	-93,93	128,04	-94,57	128,69	5,66	0,50
94	555	Campo	-98,47	-89,49	-89,26	-89,81	-90,9	-88,12	-97,37	-97,84	-97,87	-93,24	127,35	-100,14	134,26	4,43	5,42
95	180	Campo Lejano	-102,96	-90,53	-89,43	-90,16	-89,2	-89,11	-97,02	-98,6	-98,73	-93,97	128,09	-94,57	128,69	5,07	0,47
96	345	Túnel-Campo	-88,56	-93,9	-93,5	-86,58	-86,38	-89,32	-98,95	-97,98	-98,21	-92,60	126,71	-97,79	131,91	4,69	4,10
97	660	Edificio L.V. (Ce)	-93,76	-88,87	-89,97	-89,39	-89,25	-88,24	-97,49	-97,11	-98,63	-92,52	126,64	-101,00	135,11	4,06	6,69
98	330	Edificio L.V. (A)	-97,29	-90,01	-89,86	-89,09	-89,2	-89,24	-97,5	-97,06	-98,07	-93,04	127,15	-97,57	131,69	4,25	3,57
99	180	Edificio S.L.V. (A)	-103,44	-89,44	-89,82	-89,91	-90,36	-90,59	-98,91	-97,62	-98,22	-94,26	128,37	-94,57	128,69	4,99	0,24
100	135	Campo Bar	-103,55	-76,15	-79,4	-89,01	-89,06	-88,94	-95,45	-89,65	-92,56	-89,31	123,42	-93,15	127,26	5,97	3,11
101	60	Campo-Canchas	-102,91	-93,3	-90,46	-87,76	-89,72	-89,3	-89,06	-87,76	-88,94	-91,02	125,14	-89,14	123,25	3,46	1,51
102	240	Campo-Canchas	-98,1	-90,48	-89,64	-88,74	-89,14	-88,77	-89,72	-88,74	-89,3	-90,29	124,41	-95,99	130,11	1,97	4,58

PUNTO	D m	ENTORNO	MEDIDAS EN EL CAMPUS DE LA ESPE									DATOS REALES		DATOS MODELO		% D	% ERROR
			M.1 dBm	M.2 dBm	M.3 dBm	M. 4 dBm	M.5 dBm	M.6 dBm	M.7 dBm	M.8 dBm	M.9 dBm	MEDIA dBm	L_MEDIO	POTENCIA Rx	L_MEDIO		
103	150	Campo	-101,4	-90,6	-89,52	-89,94	-89,01	-89,65	-89,14	-89,94	-88,77	-90,89	125,00	-93,67	127,79	2,57	2,23
104	240	Calle	-95,46	-90,34	-90,02	-89,52	-89,82	-89,61	-89,01	-89,52	-89,65	-90,33	124,44	-95,99	130,11	1,27	4,55
105	345	Transporte	-97,2	-90,28	-88,24	-89,55	-88,65	-88,76	-89,82	-89,55	-89,61	-90,18	124,30	-97,79	131,91	1,75	6,12
106	330	Edif. Transporte	-97,36	-89,02	-90,26	-89,59	-89,03	-89,86	-89,65	-89,59	-88,76	-90,35	124,46	-97,57	131,69	1,73	5,80
107	105	Túnel-Campo	-99,27	-95,19	-93,75	-82,96	-82,66	-79,29	-89,03	-89,96	-90,86	-89,22	123,34	-91,90	126,02	5,71	2,18
108	675	Campo	-94,31	-93,8	-95,16	-90,3	-90,48	-91,42	-90,66	-90,3	-93,29	-92,19	126,31	-101,11	135,23	1,88	7,06
109	225	Campo	-103,1	-90,19	-89,56	-90,02	-90,41	-90,48	-90,48	-90,02	-91,42	-91,74	125,86	-95,67	129,79	2,75	3,12
110	315	Campo-Cívico	-100,21	-89,16	-89,04	-90,61	-90,5	-89,17	-90,41	-90,61	-90,48	-91,13	125,25	-97,34	131,46	2,21	4,96
111	90	Campo-Canchas	-102,84	-93,24	-92,99	-90,46	-91,81	-89,43	-90,5	-90,46	-89,17	-92,32	126,44	-91,14	125,26	2,91	0,93
112	150	Campo-Canchas	-100,05	-93,41	-93,36	-91,14	-92,18	-90,07	-91,81	-91,14	-89,43	-92,51	126,63	-93,67	127,79	2,23	0,92
113	180	Campo-Árbol	-97,87	-93,29	-93,33	-89,29	-89,75	-89,98	-92,18	-89,29	-90,07	-91,67	125,79	-94,57	128,69	2,42	2,30
114	285	Calle	-104,18	-93,21	-92,86	-89,35	-89,51	-90,35	-92,75	-89,35	-89,98	-92,39	126,51	-96,84	130,96	3,23	3,52
115	180	Campo-Coliseo	-103,41	-93,02	-93,3	-89,67	-89,87	-89,35	-90,51	-89,67	-90,35	-92,13	126,24	-94,57	128,69	3,22	1,93
116	210	Edificio (Coliseo)	-102,61	-93,37	-93,6	-89,06	-90,05	-89,66	-91,87	-89,06	-89,35	-92,07	126,19	-95,33	129,45	3,23	2,59
117	375	Edificio L.V. (C)	-86,95	-84,3	-84,02	-90,43	-89,88	-91,11	-90,05	-90,43	-89,66	-88,54	122,65	-98,20	132,32	2,60	7,88
118	105	Campo	-94,81	-93,98	-93,63	-90,24	-89,7	-90,52	-90,88	-90,24	-91,11	-91,68	125,80	-91,90	126,02	1,79	0,18
119	150	Campo	-102,21	-89,53	-89,66	-90,11	-90,65	-90,75	-93,7	-90,11	-90,52	-91,92	126,03	-93,67	127,79	2,92	1,39
120	225	Campo-Cívico	-99,64	-89,49	-89,61	-88,24	-88,2	-88,26	-90,65	-91,43	-90,75	-90,70	124,81	-95,67	129,79	2,38	3,99
121	240	Campo-Canchas	-95,38	-92,96	-93,35	-96,57	-96,82	-96,84	-99,15	-97,71	-97,99	-96,31	130,42	-95,99	130,11	1,67	0,24
122	225	Calle	-102,1	-93,64	-94,49	-99,63	-99,93	-99,97	-98,72	-94,1	-96,48	-97,67	131,79	-95,67	129,79	2,73	1,52
123	315	Edif. (Residencia2)	-103,4	-93,1	-93,08	-100,55	-100,15	-100,1	-99,22	-99,07	-99,23	-98,66	132,77	-97,34	131,46	2,51	0,99
124	60	Edif. (Residencia1)	-103,24	-93,27	-93,19	-100,74	-100,25	-100,28	-99,21	-99,1	-98,05	-98,59	132,71	-89,14	123,25	2,54	7,13
125	180	Edif. (Casino)	-103,54	-92,5	-92,76	-99,36	-99,93	-99,95	-98,85	-99,3	-99,59	-98,42	132,54	-94,57	128,69	2,61	2,90
126	240	Bosque	-101,05	-93,64	-93,62	-103,22	-103,52	-103,53	-98,90	-99,3	-99,08	-99,54	133,66	-95,99	130,11	2,94	2,65
127	300	Edificio S.L.V.(E)	-96,73	-85,92	-89,91	-96,73	-96,6	-96,67	-90,46	-89,8	-90,48	-92,59	126,71	-97,10	131,21	3,93	3,56
128	180	Arboles	-102,24	-93,68	-85,42	-102,77	-102,67	-102,62	-99,88	-99,34	-99,14	-98,64	132,76	-94,57	128,69	4,10	3,07

PUNTO	D m	ENTORNO	MEDIDAS EN EL CAMPUS DE LA ESPE									DATOS REALES		DATOS MODELO		% D	% ERROR
			M.1 dBm	M.2 dBm	M.3 dBm	M. 4 dBm	M.5 dBm	M.6 dBm	M.7 dBm	M.8 dBm	M.9 dBm	MEDIA dBm	L_MEDIO	POTENCIA Rx	L_MEDIO		
129	60	Campo	-98,84	-89,88	-89,21	-104,25	-104,45	-104,55	-99,49	-98,93	-99,57	-98,80	132,91	-89,14	123,25	4,16	7,27
130	510	Campo-Túnel	-97,33	-93,35	-92,62	-104,74	-104,23	-104,2	-98,71	-99,41	-99,02	-99,29	133,41	-99,72	133,84	3,45	0,32
131	360	Edificio L.V.(Ad)	-96,01	-93,52	-92,61	-103,25	-103,42	-103,72	-100,30	-100,006	-99,32	-99,13	133,25	-98,00	132,12	3,42	0,85
132	510	Edificio S.L.V.(Ad)	-103,79	-93,88	-92,98	-100,83	-100,32	-100,02	-99,43	-98,94	-99,20	-98,82	132,94	-99,72	133,84	2,42	0,68
133	210	Calle	-97,6	-93,23	-95,34	-100,35	-100,52	-100,32	-98,27	-99,18	-98,92	-98,19	132,31	-95,33	129,45	1,90	2,16
134	120	Campo	-101,15	-93,64	-95,68	-102,63	-102,69	-102,69	-94,86	-96,08	-97,57	-98,55	132,67	-92,56	126,68	3,37	4,51
135	225	Campo-Arboles	-103,79	-94,78	-93,11	-103,93	-103,46	-103,36	-94,38	-96,27	-95,00	-98,68	132,79	-95,67	129,79	4,47	2,26
136	285	Túnel-Arboles	-100,24	-93,98	-95,81	-99,36	-99,45	-99,42	-99,39	-99,46	-98,23	-98,37	132,49	-96,84	130,96	1,60	1,15
137	90	Edif. L.V. (Idiomas)	-102,11	-93,98	-93,92	-99,47	-99,73	-99,78	-96,31	-98,44	-97,89	-97,96	132,08	-91,14	125,26	2,21	5,16
138	480	Edif. (Idiomas)	-94,47	-89,78	-89,85	-96,26	-96,42	-96,52	-98,42	-98,23	-96,60	-95,17	129,29	-99,42	133,54	2,67	3,29
139	120	Edif.S.L.V.(Idiomas)	-103,67	-89,48	-89,4	-100,52	-100,5	-100,1	-90,28	-88,84	-90,79	-94,84	128,96	-92,56	126,68	5,96	1,77
140	90	Campo (Biblio)	-100,75	-81,61	-72,7	-99,64	-99,65	-99,69	-99,26	-99,15	-98,68	-94,57	128,69	-91,14	125,26	8,18	2,66
141	165	Edif. L.V.(Biblio)	-100,86	-89,97	-88,9	-102,33	-102,53	-102,63	-96,47	-93,36	-94,29	-96,82	130,93	-94,14	128,26	4,84	2,04
142	120	Edif. S.L.V.(Biblio)	-103,22	-89,92	-89,27	-91,36	-91,92	-91,92	-93,62	-92,58	-91,02	-92,76	126,88	-92,56	126,68	2,71	0,15
143	615	Calle	-100,17	-90,27	-88,83	-87,83	-87,75	-87,76	-86,66	-85,01	-86,28	-88,95	123,07	-100,65	134,77	3,13	9,50
144	375	Campo	-103,66	-89,51	-89,48	-86,38	-86,97	-86,92	-87,95	-85,92	-87,57	-89,37	123,49	-98,20	132,32	3,61	7,15
145	135	Entrada-Campo	-103,72	-89,22	-89,56	-98,25	-98,63	-98,66	-92,71	-90,58	-88,38	-94,41	128,53	-93,15	127,26	5,09	0,98
146	195	Campo S.L.V	-95,76	-89,08	-89,12	-105,63	-100,6	-100,3	-99,85	-99,42	-97,76	-97,50	131,62	-94,97	129,08	4,23	1,93
147	135	Edif. (Civil)	-87,62	-89,79	-89,98	-101,74	-101,76	-101,56	-92,64	-92,04	-90,93	-94,23	128,35	-93,15	127,26	5,28	0,84
148	165	Edif. S.L.V. (Civil)	-100,41	-89,55	-90,02	-103,25	-103,26	-103,86	-98,41	-99,28	-99,77	-98,65	132,76	-94,14	128,26	4,05	3,39
149	600	Campo	-103,73	-89,7	-89,54	-103,73	-103,74	-103,64	-95,45	-98,38	-97,32	-98,36	132,48	-100,53	134,64	4,84	1,64
150	150	Calle	-103,62	-89,96	-89,53	-92,78	-92,53	-92,54	-86,88	-89,4	-85,24	-91,39	125,50	-93,67	127,79	3,87	1,82
151	225	Bosque	-101,18	-88,34	-89,7	-87,25	-87,85	-87,8	-87,8	-90	-87,8	-89,75	123,86	-95,67	129,79	2,89	4,79
152	240	Campo	-103,63	-90,18	-89,4	-100,47	-100,4	-100,1	-100,1	-104,1	-100,1	-98,72	132,84	-95,99	130,11	4,02	2,05
153	285	Virgen L.V.(Alto)	-99,85	-98,74	-98,88	-101,44	-101,24	-101,56	-104,2	-90,56	-101,56	-99,78	133,90	-96,84	130,96	2,49	2,19
154	120	Campo(Idiomas)	-94,89	-96,82	-92,92	-103,34	-103,36	-103,18	-103,97	-94,89	-103,18	-99,62	133,73	-92,56	126,68	4,23	5,27

PUNTO	D m	ENTORNO	MEDIDAS EN EL CAMPUS DE LA ESPE									DATOS REALES		DATOS MODELO		% D	% ERROR
			M.1 dBm	M.2 dBm	M.3 dBm	M. 4 dBm	M.5 dBm	M.6 dBm	M.7 dBm	M.8 dBm	M.9 dBm	MEDIA dBm	L_MEDIO	POTENCIA Rx	L_MEDIO		
155	195	Idiom.(2ºpiso)	-94,44	-95,32	-98,42	-103,23	-103,37	-103,88	-103,5	-101,88	-103,88	-100,88	135,00	-94,97	129,08	3,19	4,38
156	480	Túnel (Central)	-103,24	-88,92	-99,89	-104,45	-104,25	-104,28	-103,67	-100,28	-104,28	-101,47	135,59	-99,42	133,54	3,36	1,51
157	180	Campo(Central)	-98,16	-99,1	-99,12	-103,53	-103,83	-103,25	-103,7	-99,25	-103,25	-101,47	135,58	-94,57	128,69	2,24	5,09
158	240	Cancha(Mec)	-99,57	-96,47	-96,34	-102,67	-102,97	-102,35	-104,36	-100,35	-102,35	-100,83	134,94	-95,99	130,11	2,33	3,58
159	525	Arboles(Bar)	-103,01	-97,03	-96,14	-102,28	-102,28	-102,75	-104,02	-104,02	-102,75	-101,59	135,70	-99,87	133,98	2,19	1,27
160	405	Campo L.V.(Gasol)	-97,96	-94,28	-93,79	-103,69	-103,19	-103,21	-104,5	-100,21	-103,21	-100,45	134,57	-98,58	132,70	3,44	1,39
161	375	Olímpica L.V	-100,49	-98	-98,53	-102,3	-102,2	-102,4	-103,27	-102,46	-102,4	-101,34	135,46	-98,20	132,32	1,53	2,32
162	525	Olímpica L.V.	-100,97	-99,6	-99,32	-102,87	-102,48	-102,56	-104,24	-100,13	-102,56	-101,64	135,75	-99,87	133,98	1,43	1,30
163	195	Calle Olimpica	-96,43	-96,54	-97,66	-102,54	-102,56	-102,3	-100,33	-96,32	-102,3	-99,66	133,78	-94,97	129,08	2,61	3,51
164	420	Edif Transporte	-103,9	-94,28	-93,32	-101,45	-101,49	-101	-103,76	-103,76	-101	-100,44	134,56	-98,76	132,88	2,94	1,25
165	570	Campo (Resi)L.V.	-97,54	-99,66	-99,36	-104,65	-104,49	-104,11	-104,11	-101,11	-104,11	-102,13	136,24	-100,27	134,39	2,36	1,36
166	165	Esquina (Resi)S.L.V.	-103,15	-99,69	-99,14	-104,56	-104,23	-104,2	-103,85	-101,2	-104,2	-102,69	136,81	-94,14	128,26	1,74	6,25
167	255	Campo (Resi)S.L.V.	-102,91	-99,6	-99,25	-103,27	-103,29	-103,97	-101,56	-103,97	-103,97	-102,42	136,54	-96,29	130,41	1,49	4,49
168	570	Edif. (Resi)L.V.	-101,24	-93,08	-99,16	-103,35	-103,53	-103,5	-103,18	-106,3	-103,5	-101,87	135,99	-100,27	134,39	2,65	1,18
169	480	Edif. (Resi)L.V.	-102,36	-92,98	-93,15	-103,45	-103,49	-103,67	-103,88	-103,6	-103,67	-101,14	135,26	-99,42	133,54	3,55	1,27
170	585	Edif. (Resi)L.V.	-101,81	-93,32	-93,17	-103,67	-103,74	-103,7	-104,28	-104,3	-103,7	-101,30	135,42	-100,40	134,52	3,53	0,66
171	510	Edif. (Resi)L.V.	-99,58	-93,23	-93,04	-104,35	-104,33	-104,36	-103,25	-100,36	-104,36	-100,76	134,88	-99,72	133,84	3,71	0,77
172	525	Parqueadero S.L.V.	-103,36	-92,7	-93,46	-104,45	-104,51	-104,52	-102,35	-101,2	-104,52	-101,23	135,35	-99,87	133,98	3,58	1,01
173	315	Campo Coliseo	-102,6	-93,37	-93,3	-104,69	-104,19	-104,17	-102,75	-102,1	-104,17	-101,26	135,38	-97,34	131,46	3,48	2,90
174	135	Campo (Col-Resi)	-103,61	-94,94	-93,08	-103,29	-103,33	-103,39	-103,21	-93,39	-103,39	-100,18	134,30	-93,15	127,26	4,24	5,24
175	270	Canchas Vóley L.V.	-100,02	-92,71	-91,5	-104,19	-104,12	-104,16	-104,52	-100,16	-104,16	-100,62	134,73	-96,58	130,69	3,99	3,00
176	480	Canchas Futbol L.V.	-97,21	-93,9	-92,65	-100,34	-100,34	-100,33	-104,17	-103,33	-100,33	-99,18	133,29	-99,42	133,54	3,09	0,18
177	720	Campo	-98,87	-92,66	-93,13	-103,16	-103,13	-103,76	-103,39	-103,4	-103,76	-100,58	134,70	-101,43	135,55	3,78	0,63
178	270	Cancha	-103,95	-93	-93,14	-104,34	-104,49	-104,11	-104,16	-102,11	-104,11	-101,49	135,61	-96,58	130,69	3,69	3,62
179	555	Pasillo Arboles	-101,25	-93,14	-94,01	-103,74	-103,1	-103,85	-102,4	-99,85	-103,85	-100,58	134,69	-100,14	134,26	3,25	0,32
180	630	Edif.(Geo1) L.V.	-98,5	-89,99	-89,98	-104,36	-104,29	-104,02	-102,56	-102,02	-104,02	-99,97	134,09	-100,77	134,88	4,77	0,59

PUNTO	D m	ENTORNO	MEDIDAS EN EL CAMPUS DE LA ESPE									DATOS REALES		DATOS MODELO		% D	% ERROR
			M.1 dBm	M.2 dBm	M.3 dBm	M. 4 dBm	M.5 dBm	M.6 dBm	M.7 dBm	M.8 dBm	M.9 dBm	MEDIA dBm	L _{MEDIO}	POTENCIA Rx	L _{MEDIO}		
181	465	Edif.(Bar)L.V.	-100,26	-92,61	-92,85	-104,65	-104,52	-104,5	-102,3	-102,5	-104,5	-100,97	135,08	-99,27	133,38	3,78	1,26
182	90	Campo	-102,93	-89,58	-89,36	-103,37	-103,23	-103,27	-101	-101,27	-103,27	-99,70	133,81	-91,14	125,26	4,56	6,39
183	540	Edif.(Geo1) L.V.	-97,41	-88,9	-89,94	-104,36	-104,22	-104,24	-104,11	-101,24	-104,24	-99,85	133,97	-100,00	134,12	5,19	0,11
TOTAL															3,92	3,58	

ANEXO 2

INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS PARA LA RED WIMAX Y SIMULACIÓN CON EL MODELO SUI EN SIRENET

Instalación de los Equipos para la Red WiMAX

La red instalada en el Campus funciona mediante el servicio de BreezeACCESS compuesto de dispositivos Alvarion, que es un avanzado sistema punto multipunto basado en tecnología OFDM, que incorpora una gama integral de funcionalidades de acceso. Permite la conectividad de unidades de usuario bajo condiciones NLOS (sin línea de vista). El resultado es una mayor cobertura, clientes más accesibles, con mayores posibilidades de ingreso a la red.

En la siguiente tabla se describe las características de los equipos para la red WiMAX.

Características de Equipos Alvarion

CARACTERÍSTICA	ESTACION BASE	CPE
Modelos	BreezeACCESS	BreezeACCESS
Estándar	802.16-2004	802.16-2004
Banda de Frecuencias	1.5GHz;2.3GHz;2.5GHz;3.3GHz;5GHz	1.5GHz;2.3GHz;2.5GHz;3GHz;5GHz
Capa Física	OFDM 256 FFT con uplink	OFDM 256 FFT con uplink
Modo Dúplex	FDD, TDD	FDD, TDD
Modulación	64 QAM a BPSK	64 QAM a BPSK
Ancho de canal	3.5 GHz; 5MHz; 7MHz; 10 MHz	3.5 GHz; 5MHz; 7MHz; 10 MHz
P. de Transmisión	20 dBm	28 dBm
Ganancia Antena	Antena Interna 18 dBi	Antena externa 8 dBi; omnidireccional
Interfaz	10/100 Base-T, RJ-11 POTS, E1/T1	10/100/1000 Base-T, E1/T1
Sensibilidad	-82 a -85 dBm	-82 a -85 dBm

En la figura a continuación se muestran los equipos instalados para la red en la ESPE



Equipos Alvarion para la Red WiMAX con su respectiva IDU y ODU

Hay que instalar los dispositivos de las unidades de la estación base como las suscriptoras en puntos estratégicos y en lo posible que la radio base tenga línea de vista directa con las suscriptoras para una recepción de señal óptima y de esta manera asegurar servicios de datos rápidos, consistentes y fiables con una velocidad de transmisión por aire altamente eficiente, permitiendo que los operadores expandan su base de clientes accesibles, aumentando significativamente las oportunidades de ingresos y generando un nuevo modelo comercial mejorado.

Se instaló la Radio Base en el Edificio de Postgrados y las estaciones suscriptoras que son seis en los edificios de Biotecnología, Electrónica, Idiomas, Central, Administrativo y Residencia, las unidades se instalaron en torres en las terrazas de cada una de las dependencias. En la figura a continuación se puede observar la ubicación Exacta de cada uno de los dispositivos en un mapa de la ESPE.



Ubicación de las Estaciones Base y Suscriptoras y sus enlaces.

Configuración de los Equipos Estación Base y Suscriptora

Es necesario que los equipos estén trabajando correctamente para lo cual se configura tanto la Radio Base como la Suscriptora. Este proceso se lleva a cabo desde una computadora que tenga el sistema operativo Windows Vista para un manejo más eficiente del comando Telnet el cual vamos a activar en la PC.

Debido a que cada dependencia cuenta con subredes independientes, fue necesaria la creación de una VLAN exclusiva para el sistema *WiMAX*. La red asignada para el sistema *WiMAX* es la 10.1.210.0/24 para este proceso se debió configurar los switches tanto de Posgrados donde se encuentra la estación base, como los de Electrónica, Biotecnología y otras estaciones suscriptora para la administración de la red.

Para la configuración de los equipos por medio del comando Telnet se sigue los pasos descritos a continuación:

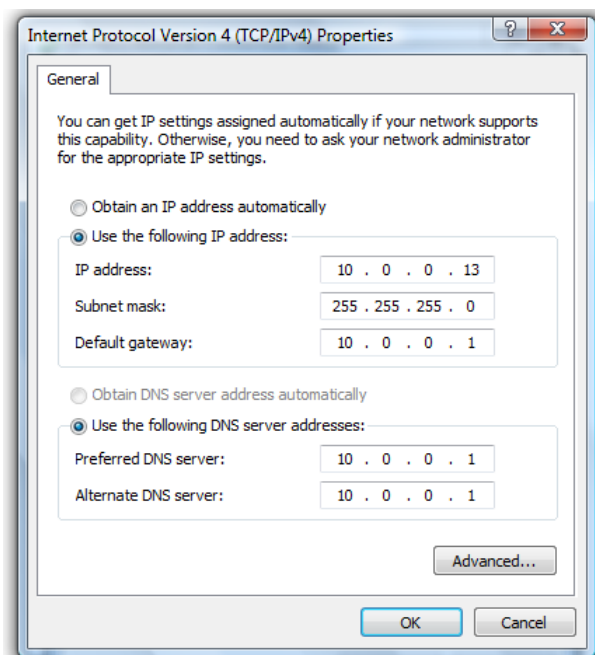
1. IP por Defecto

Se debe tener en cuenta que todos los equipos adquiridos Alvarion vienen con una dirección IP de defecto la cual es: 10.0.0.1, hay que tomar en cuenta este punto ya que la primera vez que se realiza la configuración de la Radio Base y la suscriptora, se requiere ésta en la red.

2. Ubicación del computador en la misma red del Equipo

Es necesario cambiar la dirección IP del computador para modificar las diferentes características técnicas del equipo empleado. Para realizar este cambio de IP en la PC es necesario seguir el siguiente procedimiento:

- Conexión de área local.
- Propiedades.
- Protocolo Internet (TCP/IP).
- Ubicar la dirección IP que se encuentre en el rango de la red 10.0.0.0 como se indica en la figura 2.5. con la máscara de subred y todos sus componentes.



Dirección IP que se encuentre en el rango de la red 10.0.0.0

3. Ingreso a la configuración y características del Equipo empleado.

Para ingresar al equipo antes de modificar los parámetros de la Estación Base se sigue el siguiente procedimiento:

- Ingresar a símbolo de sistema (cmd).
- Realizar un ping entre 10.0.0.1 para verificar que la IDU este en la red.
- Ingresamos al comando telnet con la dirección IP 10.0.0.1.
- Opción 3 (Administrator).
- Ingreso de clave para la cual se introduce private.

4. Modificar las diferentes características de la Estación Base.

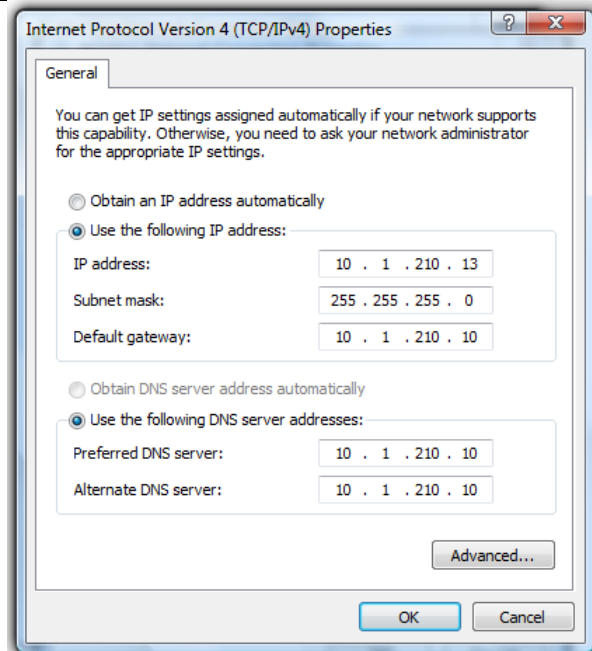
Se configura la estación base de la siguiente manera:

- Modificar la dirección IP de la Estación para lo cual se selecciona la opción D (DHCP Client).
- Se escoge la opción 1 correspondiente a DHCP Option.
- Se habilita la característica del DHCP con la opción 2 (Automatic).
- Para permitir que la Estación Base obtenga una dirección IP de forma automática a través de medios inalámbricos y cableados, en el menú DHCP Option también se modifica la opción 2 correspondiente a Access to DHCP en la que se escoge la opción 3 (From Both Ethernet and Wireless link).
- Si se desea asignar una IP selecciono la opción 3 (Basic Configuration) y a continuación opción 1, en este momento ingreso la dirección IP, la cual debe estar en el rango de la red 10.1.210.0

5. Guardar Cambios

A través de la opción 2 (Unit Control) en el menú del nivel superior ingreso la opción 1 (Reset Unit) de esta manera agrego todos los cambios de configuración al Dispositivo.

Con este proceso cambiamos la dirección IP a 10.1.210.10 para conexión remota a la IDU como se muestra en la siguiente figura y verificamos la conexión a la Red a través de un ping a la nueva IP de la IDU con cmd.



Dirección IP a 10.1.210.10 para conexión remota a la IDU

Simulación de la red WiMAX con el modelo SUI en el programa SIRENET

El modelo de propagación SUI es el que se va a utilizar para la simulación, y como se cambió la ubicación de la estación base a otro edificio la cobertura cambia. la fórmula esta expresada en GHz para la frecuencia y la distancia en metros.

Se procede a introducir los valores del modelo matemático de SUI: $P_{L\text{modificado}} = -24,596 + 26 \log f + 50,73 \log d$ en la ventana correspondiente al nuevo modelo de propagación, se ingresa los valores tanto de las constantes como de los operadores y las variables f y d .

Una vez que se han seleccionado los parámetros generales de cobertura, se carga los mapas y se escoge el tipo de gestión de servicio que para nuestro caso es *WiMAX*. En este momento se puede empezar a trabajar con los distintos componentes de la red. En primer lugar se configuran los parámetros del transmisor, para luego continuar con el receptor y generar los resultados esperados.

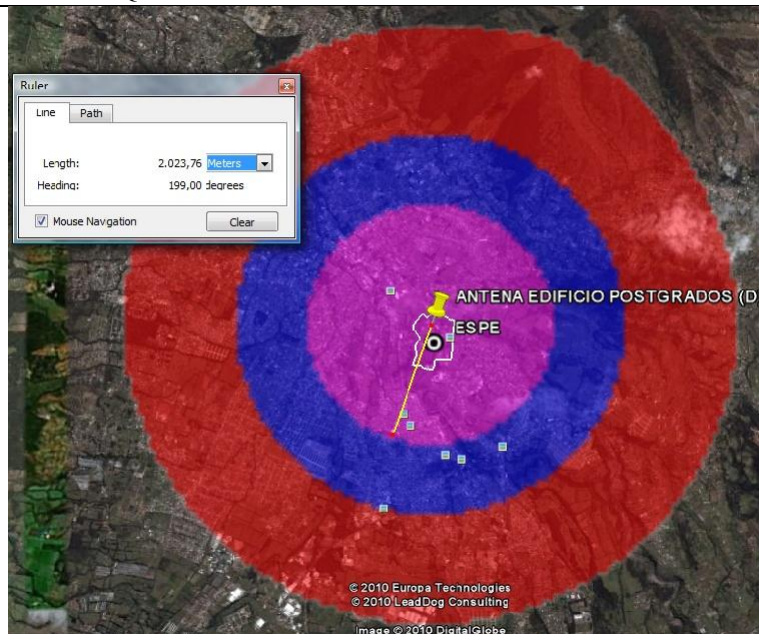
La localidad de la antena omnidireccional transmisora en coordenadas geográficas es $0^{\circ}18'46.32''S$ para la latitud y $78^{\circ}26'42.71''W$ para longitud, esta se ubica en el Edificio de Posgrados y tiene una altura de 15 metros. La antena tiene una ganancia de 7 dBi con pérdidas de 2 dBm y la potencia de transmisión es de 22 dBm a una velocidad de 10 Mbps, la cual utiliza modulación 16 QAM. Otro parámetro importante para la transmisión es MTBF (Medium Time Before Failure) y MTTR (Medium Time to Repair) los cuales corresponden a los valores de 62500 h y 5 h respectivamente. Todos estos parámetros son introducidos en la ventana que corresponde a la antena de transmisión.

Para la antena omnidireccional de recepción los parámetros que se introducen deben acoplarse a la antena de la radio base la cual trabaja en la frecuencia de 5,5 GHz y en las características antes descritas. Esta antena funciona con una potencia umbral de -82 dBm, a una impedancia de 50Ω . Se introduce estos parámetros en la ventana correspondiente a la antena de recepción. Cabe recalcar que la altura promedio de las edificaciones es de 5 m.

Cuando se introduce todos los parámetros descritos, se realiza el cálculo de cobertura. Siempre y cuando se haya delimitado el área de cobertura ya que resulta importante para el análisis de la red a fin de conocer la extensión de la misma dentro del área geográfica de estudio.

Finalmente con el objetivo de realizar una mejor visualización del área de cobertura obtenida, la herramienta SIRENET tiene la opción de realizar exportación hacia Google Earth. De esta manera tenemos el barrido de la señal con los colores de cobertura y el mapa real del Campus con todas las edificaciones, calles, bosque y todo el entorno que corresponde a la ESPE.

A continuación se muestra la siguiente figura correspondiente al programa de SIRENET. Cabe mencionar que la imagen presentada esta exportada desde el simulador a Google Earth, luego de haber obtenido el área de cobertura, gracias a las características del sistema WiMAX que fueron consideradas en el programa.



Área de cobertura en SIRENET.

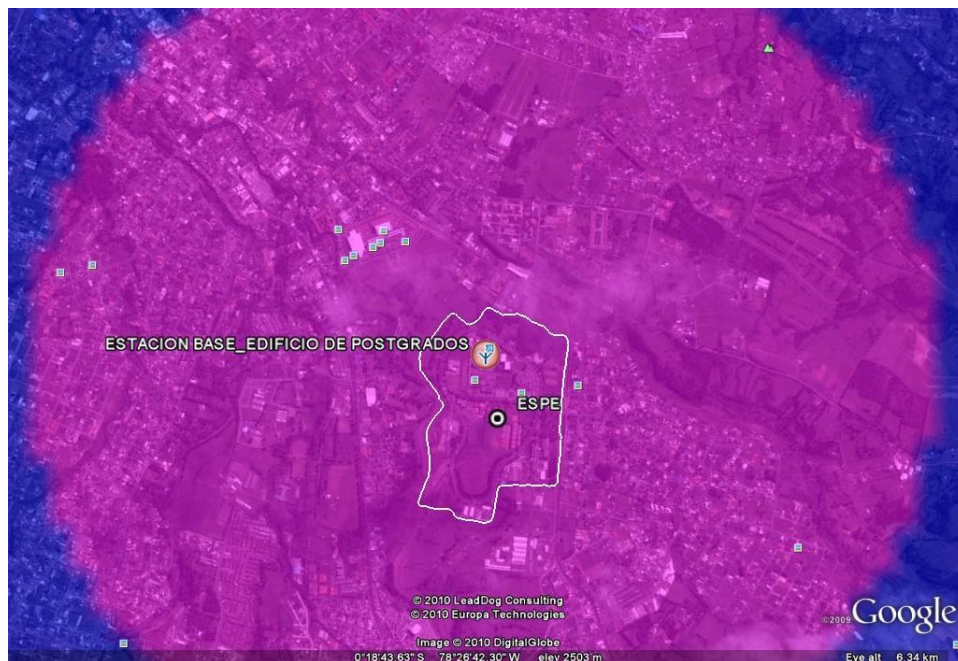
En el gráfico se presenta la ubicación de la antena de la Estación Base y a partir de esta, se dibuja el radio de cobertura, y se obtiene 3 zonas representadas por colores que están asociados a un rango de potencia de señal recibida en cada punto. En la tabla se establecen los rangos de potencia para cada color de cobertura.

Rangos de potencia para cada color de cobertura.

COLOR	RANGO	CARACTERÍSTICA DE COBERTURA
Rosado	$-66 \text{ dBm} \leq P$	Área donde se obtiene una excelente cobertura y los equipos pueden trabajar en condiciones favorables para que los usuarios obtengan las señales transmitidas.
Azul	$-76 \text{ dBm} \leq P < -66 \text{ dBm}$	Se obtiene cobertura sin embargo esta no es tan buena como en el caso anterior y los niveles de potencia de transmisión se deben incrementar para recibir la señal, tomando en cuenta que dichos niveles de potencia deben estar dentro de los límites establecidos por los entes reguladores a fin de no causar daños en la salud de las personas.
Rojo	$-86 \text{ dBm} \leq P < -76 \text{ dBm}$	Área donde a pesar de tener cobertura, los equipos deben presentar potencias y sensibilidades muy grandes para recibir y procesar las señales transmitidas.

En la figura se puede identificar el contorno de toda la ESPE, el mismo que se encuentra dentro del área de color rosado, esta coloración tiene una distancia radial de 2000 metros, y supera por más del doble al Campus Politécnico, por tanto las consideraciones de diseño son adecuadas.

Se realizó un acercamiento para verificar en este caso si el Campus Politécnico se encuentra dentro de la zona de interés, por medio del programa Google Earth se puede revisar cualquier característica topográfica.



Cobertura de la señal de la Estación Base

El Campus esta dentro del color con más alto índice de potencia recibida, esta área corresponde a una señal donde se obtiene una excelente cobertura y los equipos trabajan de manera eficiente y no sufren excesivas pérdidas de propagación. La antena de la radio base a pesar de no contar con la altura necesaria, se encuentra en una zona idónea para el establecimiento del enlace en la red de acuerdo a las características técnicas de los equipos.

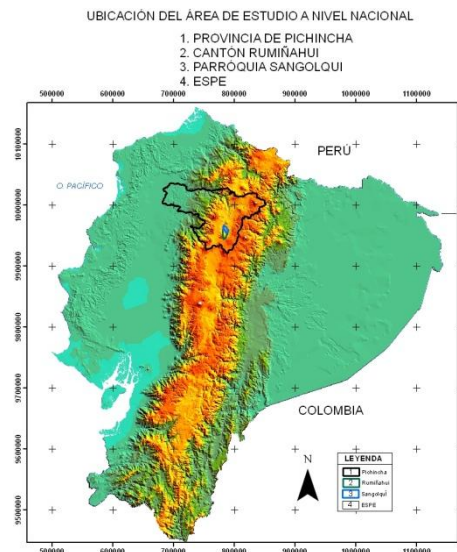
ANEXO 3

PROCEDIMIENTO PARA ELABORAR LOS MAPAS DE COBERTURA CON LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA ARCGIS

UBICACIÓN Y ALCANCE

Ubicación espacial del área de estudio a nivel Nacional

La Escuela Politécnica del Ejército, con una superficie de 53 hectáreas aproximadamente, está ubicada a nivel Nacional en la Provincia de Pichincha, Cantón Rumiñahui, Parroquia Sangolquí, situada en el Valle de los Chillos una distancia de 22 kilómetros al Sur-Este de Quito, una altura de 2.510 (m.s.n.m.) y una temperatura promedio de 15° C., que le permite tener un clima Andino cálido y húmedo.



Ubicación de la ESPE con respecto al territorio Nacional

El área de estudio se encuentra ubicada entre las coordenadas:

Coordenadas correspondientes a los cuatro vértices de la ESPE

PUNTO	X	Y
1	783939	9965635
2	784739	9965635
3	784739	9964611
4	783939	9964611

Limita al Norte con la Hcda. San Luís, al Sur con el Complejo Fabril FAME, al Oeste el denominado Paseo Escénico de Santa Clara y el río Pita y al Este con la Autopista General Rumiñahui y la Urbanización la Colina.

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
"DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED CON TECNOLOGÍA WIMAX
(IEEE 802.16 -2004) PARA EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE"

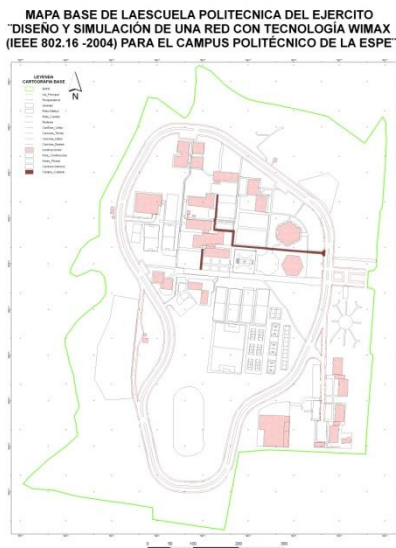


Linderos del área de estudio

RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE INFORMACIÓN DISPONIBLE

Se analizó y evaluó la información que fue proporcionada por el laboratorio de Geomática de la Carrera de Ingeniería Geográfica y Medio Ambiente de la ESPE, que fue la siguiente:

- Limite predial de la ESPE, vía principal, parqueaderos, veredas, pista atlética, patio central, parterre, canchas de fútbol, volley, basket, construcciones, área de construcción, áreas planas, caminos internos, camino cubierto, grilla radiada.



Cartografía Básica de la ESPE

Con esta información se construyó el mapa base sobre el cual se depositó los datos de potencia obtenidos en campo, cada uno de ellos se encuentran georeferenciados.

SELECCIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS DE SENSORES REMOTOS (FOTOGRAFÍA AÉREA)

Fotografía aérea

Con el fin de representar los datos planimétricos y de potencia, se utilizó además de la Cartografía Base, fotografía aérea color, georeferenciada con equipos geodésicos submétricos de doble frecuencia, de la ESPE.

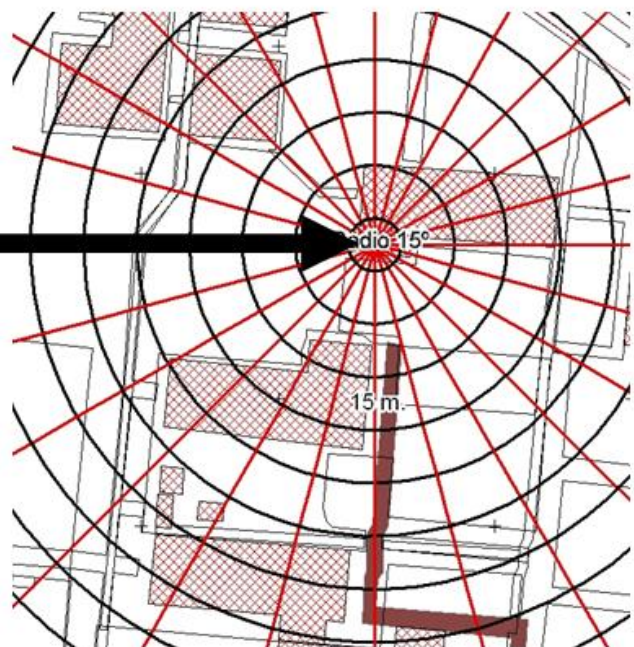
Para que la distribución de las medidas de potencia puedan ser ubicadas con precisión en el fotomapa, se realizaron procesos de interpretación analógica y digital donde fueron ubicados los puntos de potencia con sus correspondientes coordenadas.

aerotransportadas o en satélites artificiales, los cuales captan la radiancia emitida, reflejada o absorbida obteniéndose una imagen o fotografía. Para el presente caso utilizaremos fotografía aérea color georeferenciada y que en adelante será denominada fotomapa.

- Para la Espacialización de los datos Se utilizó el software ArcGis 9.2 especializado en el manejo, almacenamiento y organización de información espacial (mapas) y no espacial (atributos), que permitió analizar y desplegar eficientemente todas las formas de datos de potencia geográficamente referenciados, obteniendo así, en forma organizada y rápida, regiones de recepción de señal en toda la ESPE.
- Con la finalidad de ajustar la información a la grilla radiada, se procedió a efectuar comprobaciones de recepción de señal de potencia en campo, para lo cual, se planificó y ejecutó campañas de recolección de datos.

MAPA BASE DE LA ESCUELA DE LA POLITECNICA DEL EJERCITO
CON LA GRILLA RADIADA Y EL FOTOMAPA COLOR

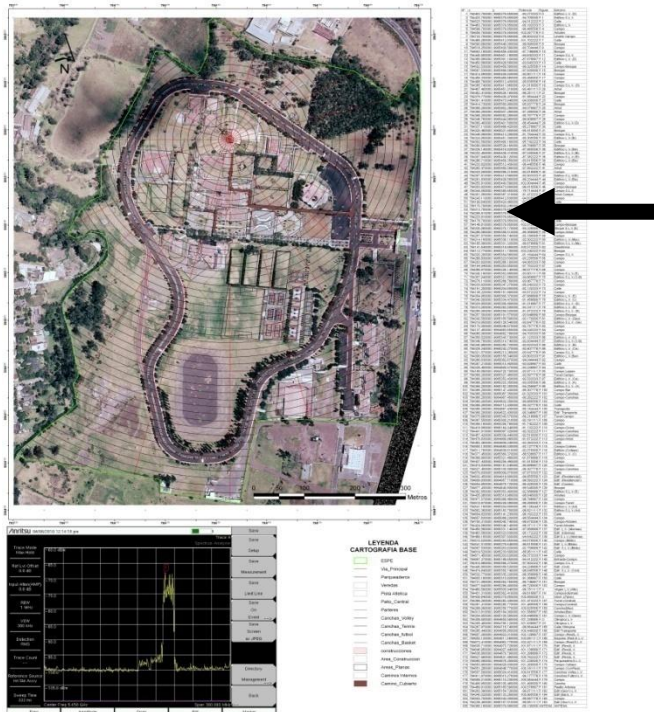
DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED CON TECNOLOGÍA WIMAX
(IEEE 802.16 -2004) PARA EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE



Construcción de la grilla radiada en el edificio donde se encuentra la antena y con desplazamientos de 15 metros

**MAPA BASE DE LA ESCUELA DE LA POLITECNICA DEL EJERCITO
CON LA GRILLA RADIADA Y EL FOTOMAPA COLOR**

**"DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED CON TECNOLOGÍA WIMAX
(IEEE 802.16 -2004) PARA EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE**



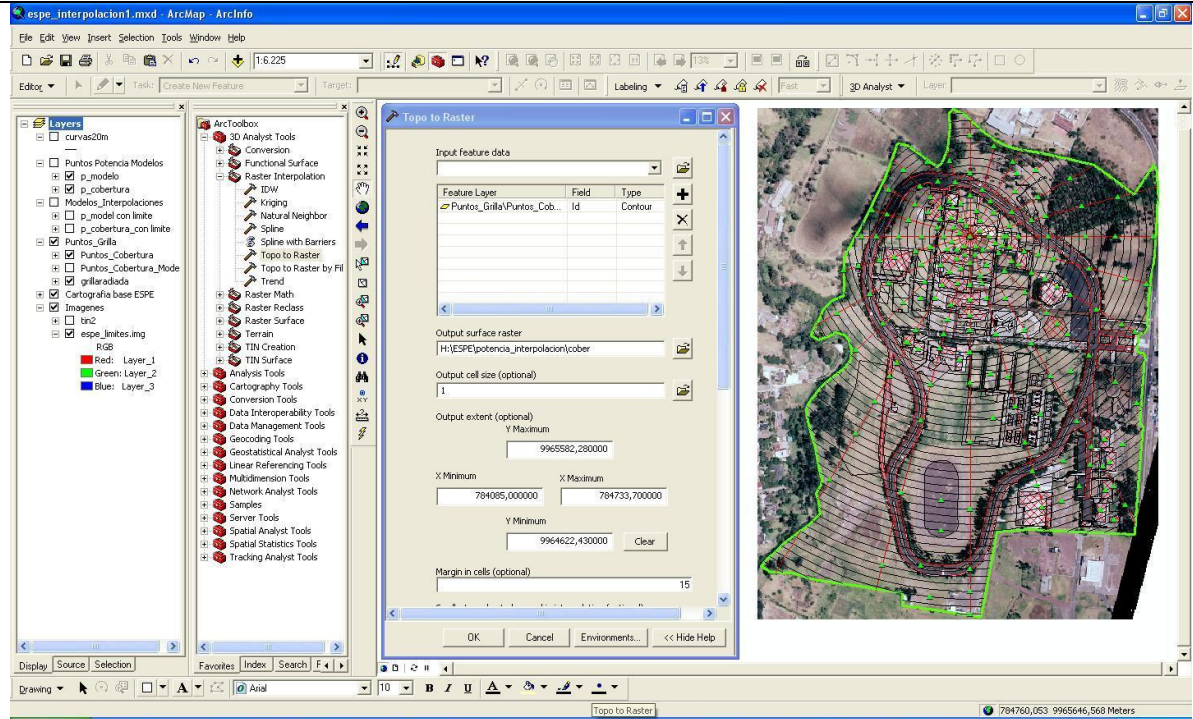
Tomando como base para la construcción de la grilla radiada, el edificio donde se encuentra la antena, se realizó desplazamientos con el equipo que registró las lecturas de potencia.

Obteniendo el mapa de puntos de señal con los cuales y mediante procedimientos de interpolación se construyó Regiones de Recepción de Potencia

En base a los puntos de Cobertura y con la ayuda de ArcGis, se utilizó el módulo interpolación para obtener las regiones de intensidad de potencia y espacializar las mismas según el siguiente proceso:

- Ingresamos al proyecto que se está manejando en ARGIS
- Activamos las herramientas de ArcGis “arcToolbox”
- Se ingresa 3D Analyst Tools
 - Raster Interpolation
 - Topo to Raster

E ingresamos el archivo .Shp de puntos de intensidad de potencia obtenidos en campo, llamado Puntos_Cobertura.Shp

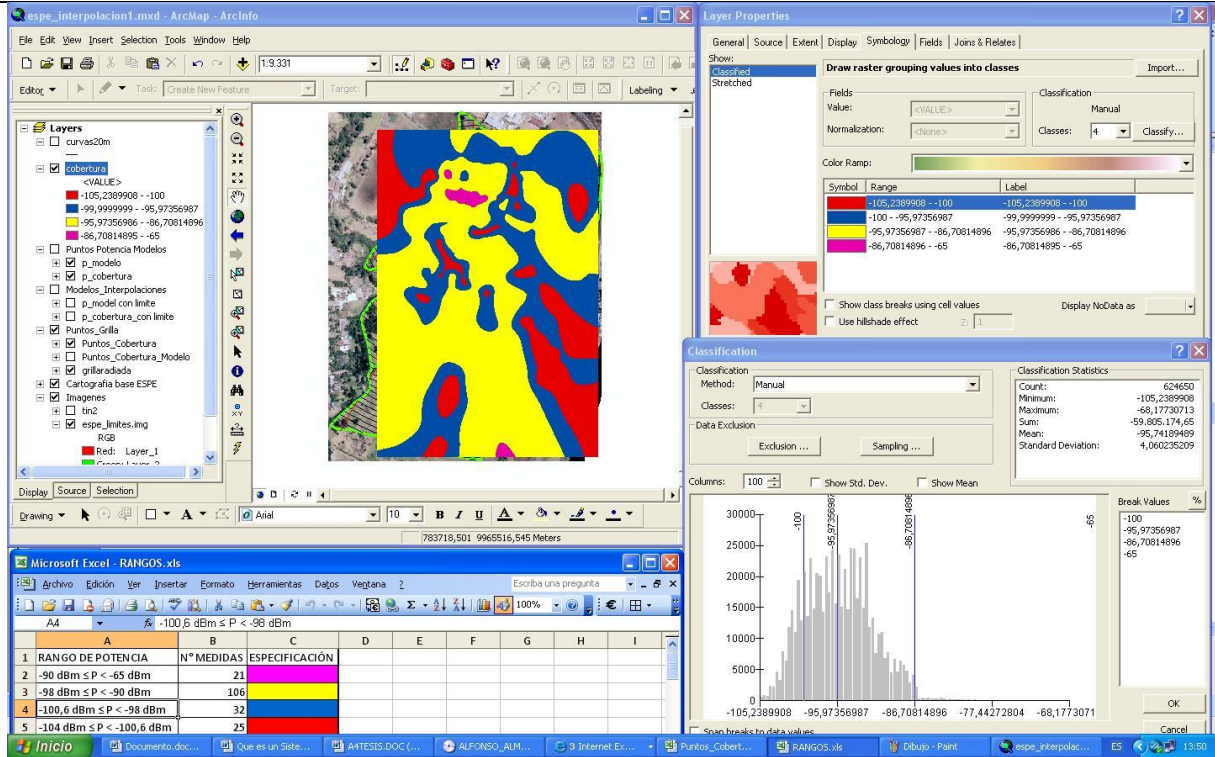


Interpolación de puntos de Intensidad de Potencia obtenidos en campo

Ponemos a ejecutar este proceso y obtenemos el mapa de regiones de intensidad de potencia en base a los rangos previamente establecidos que son:

Rangos de, para la construcción de regiones de Potencia, para los puntos obtenidos en campo y para el modelo propuesto

Nº	RANGO DE POTENCIA
1	$-94 \text{ dBm} \leq P < -65 \text{ dBm}$
2	$-98 \text{ dBm} \leq P < -94 \text{ dBm}$
3	$-100,6 \text{ dBm} \leq P < -98 \text{ dBm}$
4	$-104 \text{ dBm} \leq P < -100,6 \text{ dBm}$



Interpolación de puntos de Intensidad de Potencia en base a los rangos preestablecidos, para los datos de campo

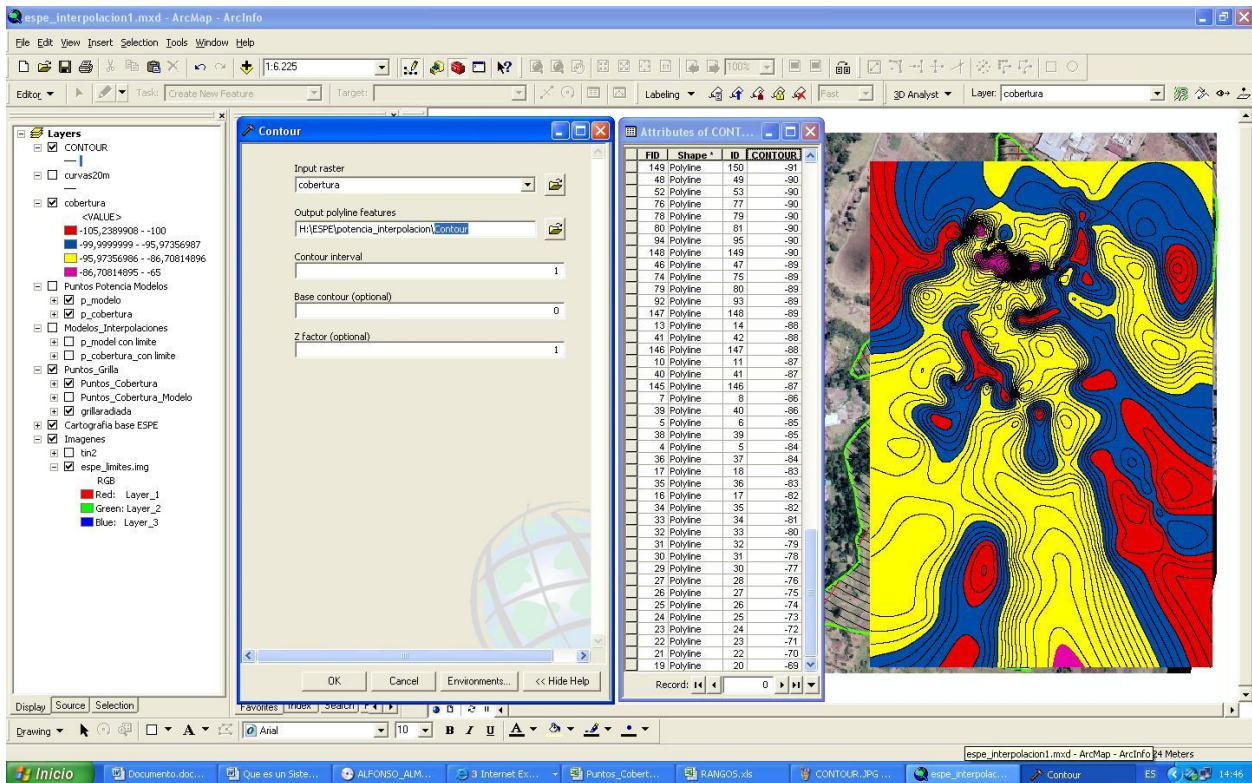
Obteniendo como resultado cuatro regiones de intensidad de potencia con el código de color adoptado pero en formato raster.

Este resultado en formato raster debe ser convertido a formato .SHP, mediante el siguiente proceso:

- Ingresamos al proyecto que se está manejando en ARGIS
- Activamos las herramientas de ArcGis “arcToolbox”
- Ingresamos 3D Analyst Tools
 - Raster Surface
 - Contour

E ingresamos el archivo raster de regiones de intensidad de potencia obtenidos en el proceso anterior que se denomina, cobertura.jpg

Obteniendo un archivo de isoclinas (lineas), denominado contour.shp



Construcción de isoclinas con valores de potencia

RESULTADOS

A este archivo de isoclinas tenemos que convertir en polígonos ajustado con el límite del proyecto y con el código de color estipulado en los rangos previamente establecidos, para lo cual realizamos el siguiente proceso:

- Ingresamos al proyecto que se está manejando en ARGIS
- Activamos las herramientas de ArcGis “arcToolbox”
- Data Management Tools
 - Features
 - Feature to polygon

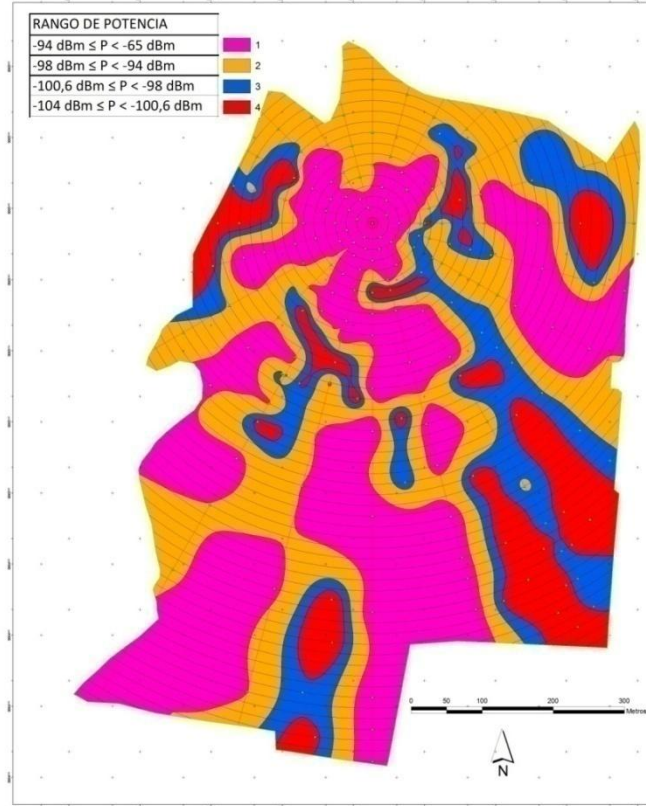
El código de color estipulado en los rangos es el siguiente

Rangos y colores para la cobertura de la señal

RANGO DE POTENCIA	Nº MEDIDAS	ESPECIFICACIÓN
$-94 \text{ dBm} \leq P < -75 \text{ dBm}$	81	
$-98 \text{ dBm} \leq P < -94 \text{ dBm}$	46	
$-100,6 \text{ dBm} \leq P < -98 \text{ dBm}$	32	
$-104 \text{ dBm} \leq P < -100,6 \text{ dBm}$	25	

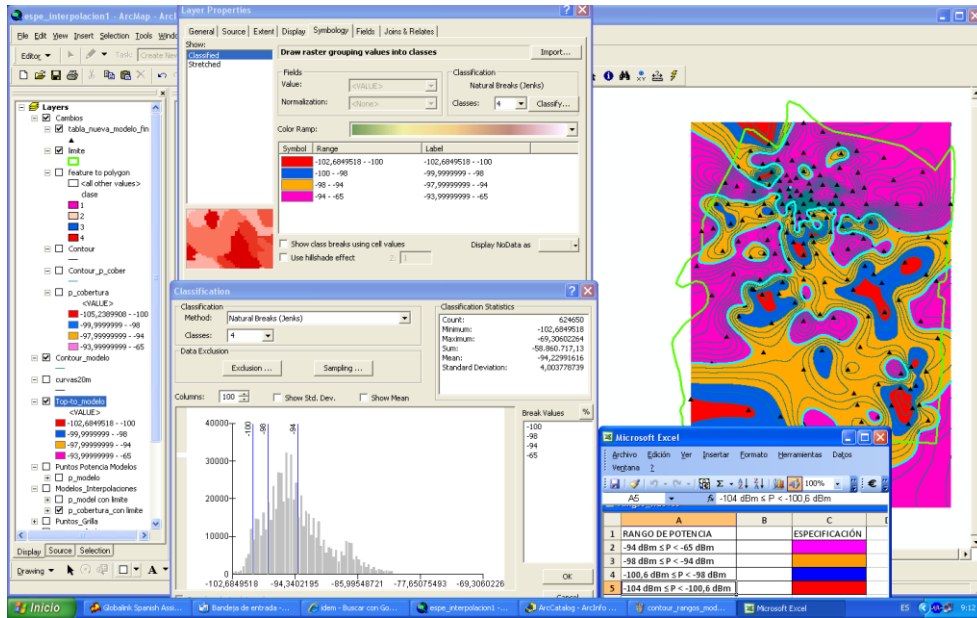
Para los datos reales obtenidos en el campo

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL AREA DE COBERTURA DE RECEPCION DE POTENCIA DE LAS MEDIDAS REALES, TOMADAS EN CAMPO CON EL ANALIZADOR DE ESPECTROS "ANRITSU" "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED CON TECNOLOGÍA WIMAX (IEEE 802.16 -2004) PARA EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE"



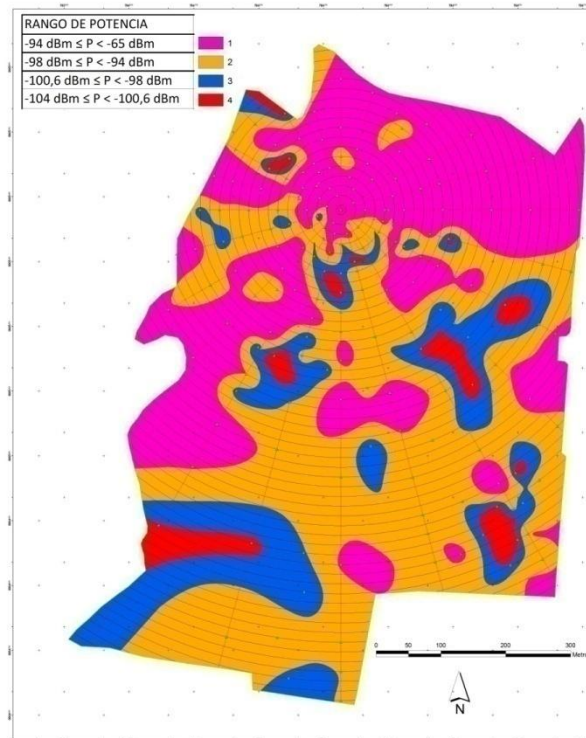
Mapa de regiones de Potencia, de los datos obtenidos en campo

De forma similar para el modelo propuesto



Interpolación de puntos de Potencia en base a los rangos preestablecidos, para el modelo propuesto

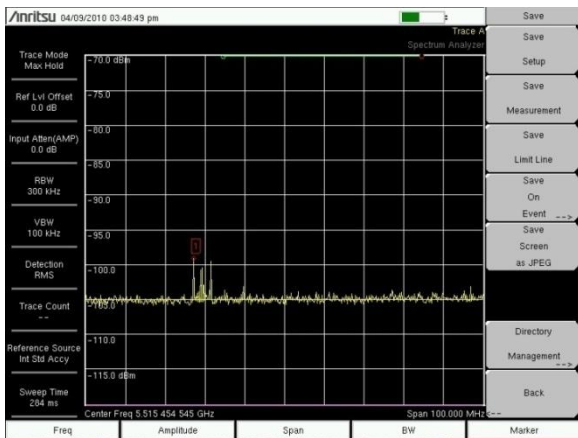
REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL AREA DE COBERTURA DE RECEPCIÓN DE POTENCIA DEL MODELO ESPE_MODEL "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED CON TECNOLOGÍA WIMAX (IEEE 802.16 -2004) PARA EL CAMPUS POLITÉCNICO DE LA ESPE"



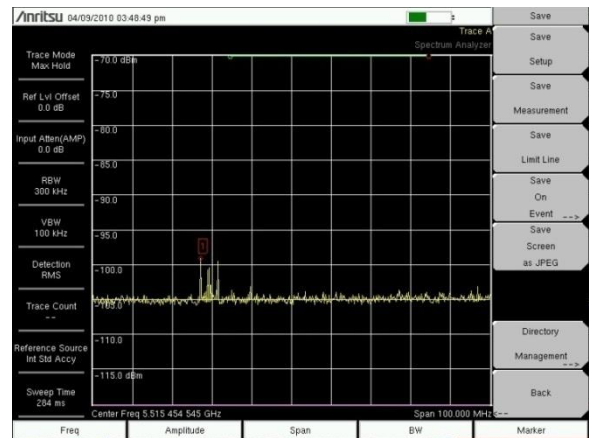
Mapa de regiones de Potencia, de los datos del modelo propuesto

ANEXO 4

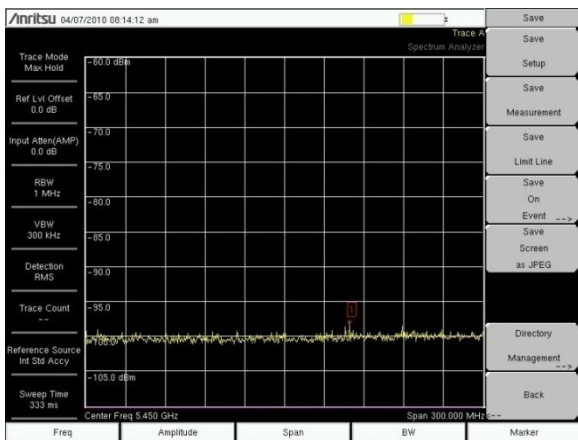
**GRÁFICAS MÁS IMPORTANTES DE PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL
WIMAX EN PUNTOS DETERMINADOS PARA IDENTIFICAR EL
MAPA CON LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA ARCGIS**



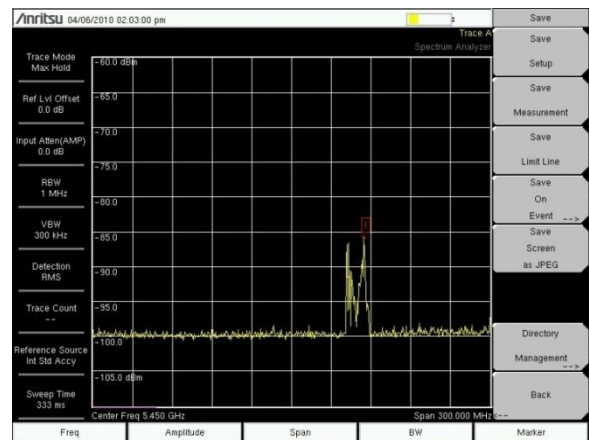
Punto 0. Edificio L.V. (D)



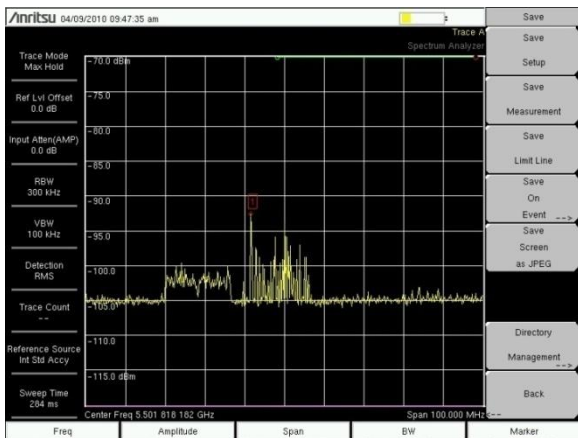
Punto 1. Edificio S.L.V.



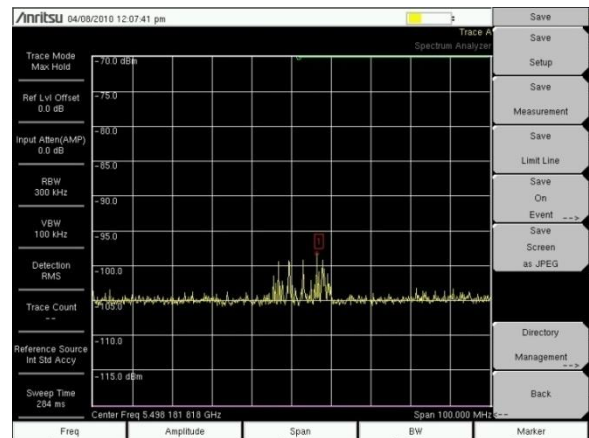
Punto 2. Calle



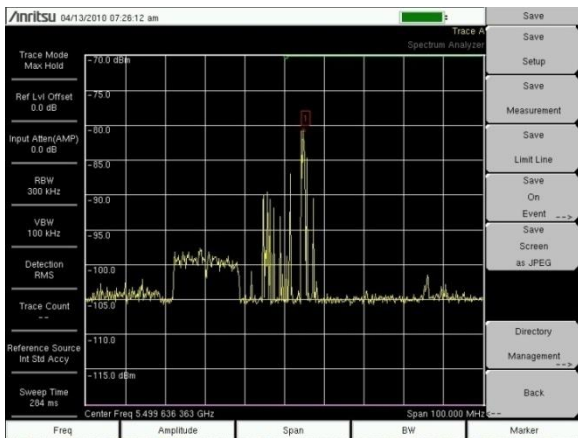
Punto 3. Edificio L.V. (Civil)



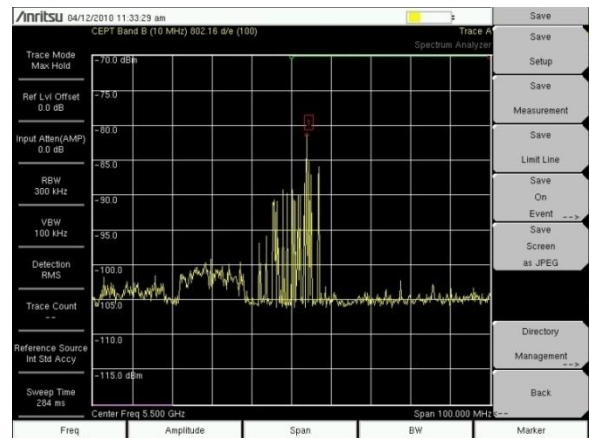
Punto 25. Árboles



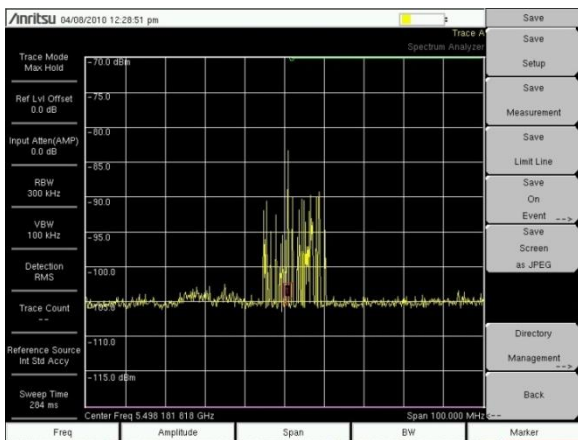
Punto 32. Campo NLOS



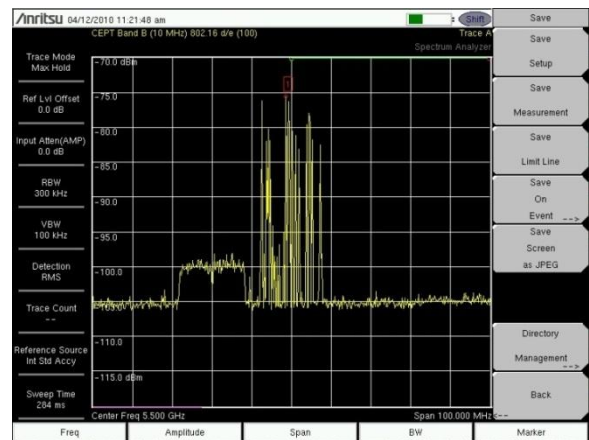
Punto 38. Edificio Electrónica NLOS



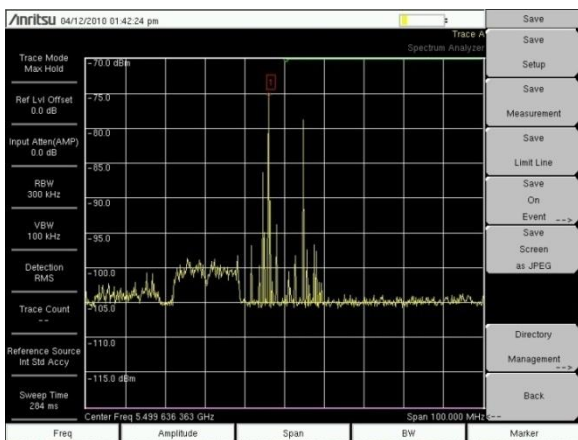
Punto 75. Edificio Bloque E LOS



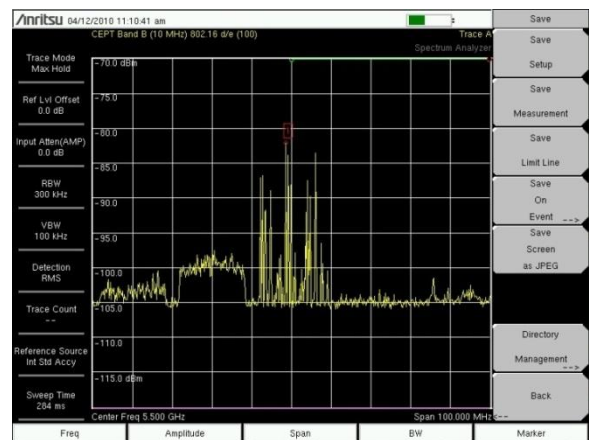
Punto 42. Campo



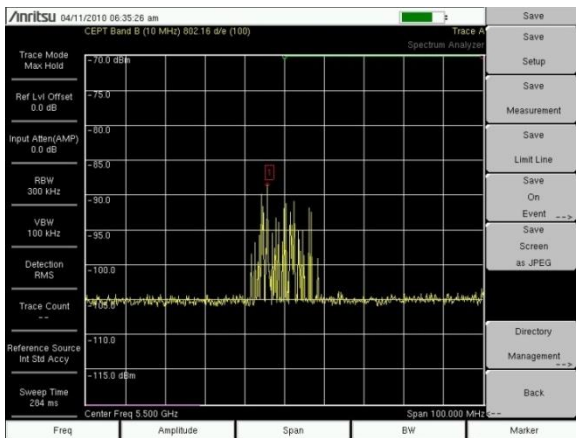
Punto 86. Edificio Bloque C LOS



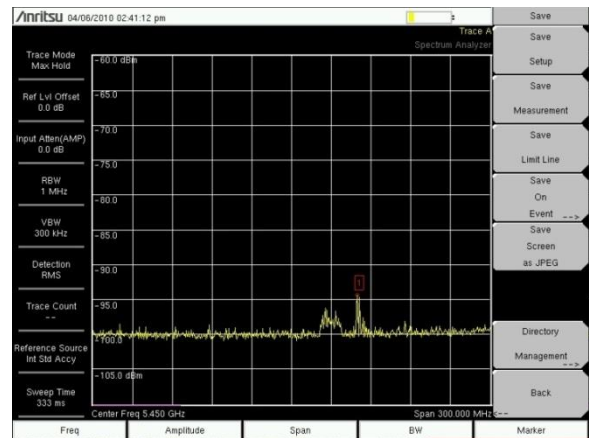
Punto 32. Edificio Electrónica LOS



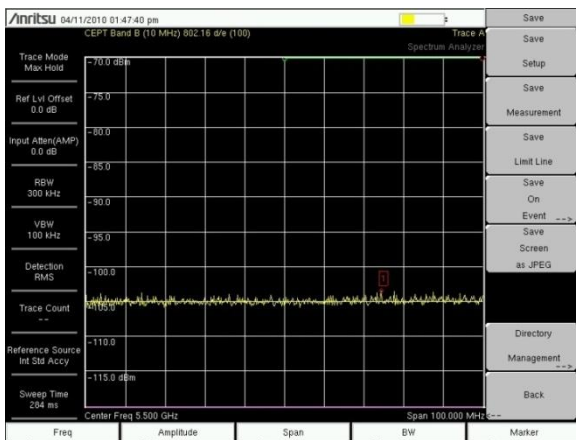
Punto 88. Edificio Bloque B LOS



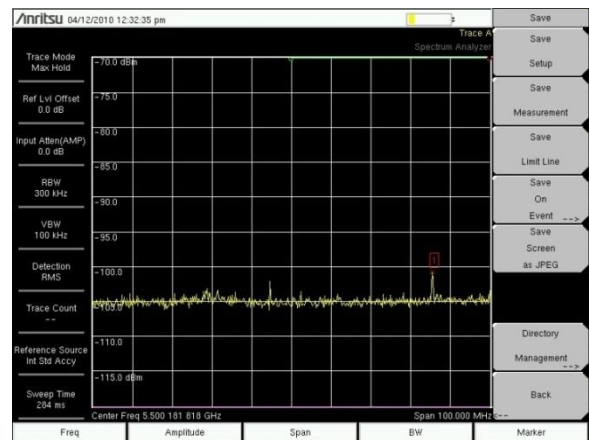
Punto 96. Túnel y Campo



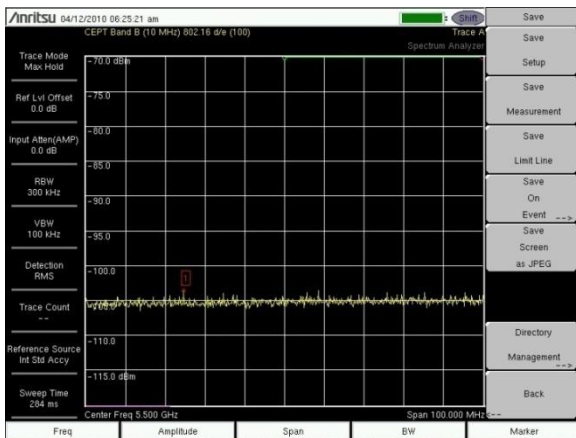
Punto 138. Edificio Idiomas LOS



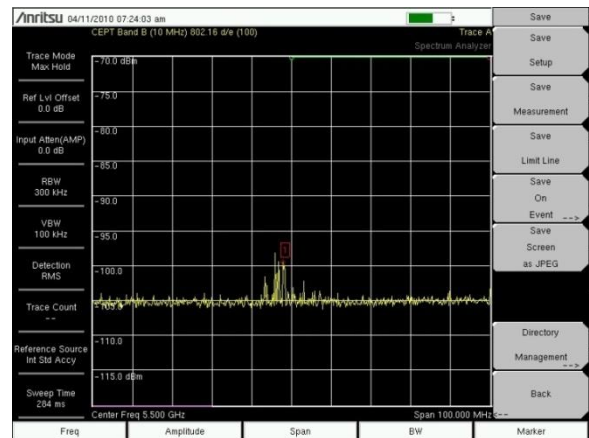
Punto 115. Campo y Coliseo



Punto 141. Edificio Biblioteca NLOS



Punto 125. Edificio Casino NLOS



Punto 158. Canchas Mecánica

FECHA DE ENTREGA

El presente proyecto de grado fue entregado en la fecha.

Sangolquí, _____ 2010

Realizado por:

Diego Alfonso Almeida G.

Ing. Gonzalo Olmedo
COORDINADOR INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES