

Herramienta Software de Planeación Radio para Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo en Ambientes Rurales



**Bresly Lorena Mesa Mazo
Daniel Orlando Díaz López**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
GRIAL –Grupo de Radio e InALámbricas
Popayán, Abril 2009**

Herramienta Software de Planeación Radio para Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo en Ambientes Rurales



Trabajo de Grado

**Bresly Lorena Mesa Mazo
Daniel Orlando Díaz López**

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez
Asesor: Juan Carlos Corrales

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación: Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
GRIAL –Grupo de Radio e InALámbricas
Popayán, Abril 2009**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar queremos agradecerle a nuestro director de Tesis Víctor Manuel Quintero por su apoyo, dedicación y dirección que hoy hacen posible la finalización de este trabajo de grado.

Queremos agradecerle también al los integrantes del Grupo Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT) por las facilidades y colaboración recibida en el desarrollo de este trabajo de grado.

Finalmente a Dios y a nuestras familias, con las cuales hemos contado en el transcurso de la carrera.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. SISTEMAS FWA	3
1.1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE ACCESO INALÁMBRICO FIJO.....	3
1.1.1 Definición de un Sistema FWA.....	5
1.1.2 Bandas de Frecuencia	8
1.1.3 Tecnologías utilizadas para FWA.....	12
1.2 CONFIGURACIÓN GENERAL DE UN SISTEMA FWA	18
1.2.1 Tipos de redes inalámbricas fijas.....	18
1.2.2 Presupuesto ó balance del enlace.....	21
2. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE UN SISTEMA DE ACCESO INALÁMBRICO FIJO EN UN ENTORNO RURAL.....	28
2.1 GENERALIDADES DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN.....	28
2.1.1 Definición de modelo de propagación	29
2.1.2 Clasificación de los modelos de propagación.....	29
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN	30
2.2.1 Modelos Empíricos.....	30
2.2.2 Modelos Semi-Empíricos:.....	38
2.2.3 Modelos Analíticos:.....	43
2.3 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN	57
2.3.1 Comparación de los resultados obtenidos haciendo uso de los modelos de propagación en un entorno rural para la banda de 2.4 Ghz	57
2.3.2 Análisis y selección de modelos de propagación.....	61

3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	63
3.1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	63
3.1.1 Definición de SIG.....	64
3.1.2 Funcionamiento.....	65
3.1.3 Componentes de un SIG	67
3.1.5 ¿Qué puede hacer un SIG por el usuario?	69
3.2 ARCGIS DESKTOP	71
3.2.1 ArcView, ArcEditor y ArcInfo.....	71
3.2.2 ArcMap.....	72
3.2.3 ArcCatalog	72
3.3 PERSONALIZACIÓN DE APLICACIONES ARCGIS DESKTOP	74
3.3.1 Desarrollo de Macros VBA en Aplicaciones ArcGIS.....	75
3.3.2 Desarrollo de Componentes en aplicaciones ArcGIS Desktop.....	76
3.4 ARCOBJETS.....	77
3.5 INTRODUCCIÓN A LA HERRAMIENTA SOFTWARE DE PLANEACIÓN RADIO PARA SISTEMAS DE ACCESO INALÁMBRICO FIJO EN AMBIENTES RURALES	80
4. PRUEBAS.....	83
4.1 CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN.....	83
4.2 EVALUACIÓN DE UN RADIO ENLACE ENTRE CAJETE Y EL MUNICIPIO DE PURACÉ DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA EN LA BANDA DE 2.4 GHZ	84
4.2.1 Análisis de los modelos de propagación	87
4.2.2 Análisis del Balance de Potencia del Enlace	89
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	91
5.1 CONCLUSIONES.....	91
5.2 TRABAJOS FUTUROS.....	93
BIBLIOGRAFIA.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura de un sistema FWA.	6
Figura 2. Zona de cobertura de una estación base.....	7
Figura 3. Red inalámbrica con estándares ETSI	18
Figura 4. Conexión Punto a Punto	19
Figura 5. Conexión Punto Multipunto	19
Figura 6. Red en malla	20
Figura 7. Elementos del presupuesto del enlace.....	21
Figura 8. Diagrama de bloques básico del terminal transmisor	21
Figura 9. Pérdidas debido al <i>radome</i>	24
Figura 10. Diagrama de bloques básico del terminal receptor	25
Figura 11. Geometría de un trayecto de propagación.....	45
Figura 12. Pérdidas por difracción en función de ν	46
Figura 13. Trayecto de propagación con tres aristas	47
Figura 14. Geometría para el cálculo de pérdidas de propagación sobre tierra plana	54
Figura 15. Potencia de recepción en función de la distancia.....	56
Figura 16. Perfil del trayecto de propagación	58
Figura 17. Comparación de pérdidas de trayecto para la banda de 2.4 Ghz	60
Figura 18. Modelo Raster y Vector	66
Figura 19. Superposición de capas	67
Figura 20. Interfaz gráfica de ArcMap	73
Figura 21. Interfaz gráfica de ArcCatalog	73
Figura 22. Caja de dialogo para personalización.....	74
Figura 23. Interfaz Visual Basic Editor (VBE).	75
Figura 24. Estructura modular de ArcGIS Desktop.....	77
Figura 25. Librerías de la aplicación ArcGIS Desktop.....	78
Figura 26. Interfaz de la herramienta	86
Figura 27. Perfil del trayecto de propagación	86
Figura 28. Línea de visualización entre el transmisor y el receptor	87
Figura 29. Comparación de pérdidas de trayecto en la banda de 2.4 Ghz.	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Servicios fijos y bandas de frecuencia licenciadas en USA	10
Tabla 2. Servicios fijos y bandas de frecuencia licenciadas en Europa	11
Tabla 3. Servicios fijos y bandas de frecuencia no licenciadas en USA	11
Tabla 4. Servicios fijos y bandas de frecuencia no licenciadas en Europa	12
Tabla 5. Valores típicos de pérdida en los cables para la banda de 2.4 Ghz	22
Tabla 6. Valores de atenuación debidas al tipo de línea de transmisión	23
Tabla 7. Pérdidas de espacio libre [dB] para diferentes distancias y frecuencias	25
Tabla 8. Valores típicos de sensibilidad del receptor para tarjetas de red inalámbricas....	25
Tabla 9. Comparación de las relaciones S/N y Eb/No para varios esquemas de modulación digital	26
Tabla 10. Parámetros del modelo COST 231 Hata	31
Tabla 11. Parámetros del modelo ECC-33	33
Tabla 12. Valores de atenuación debidas al tipo de terreno	36
Tabla 13. Parámetros de referencia modelo Lee	37
Tabla 14. Parámetros del sistema modelo Longley Rice	39
Tabla 15. Forma de terreno.	39
Tabla 16. Valores para las constantes eléctricas del terreno	39
Tabla 17. Valores para la refractividad de la superficie (Ns) en función del clima	40
Tabla 18. Pérdidas de trayecto en la banda de 2.4 Ghz	59
Tabla 19. Bandas de frecuencia aplicables según el modelo de propagación.	83
Tabla 20. Rangos de distancia aplicables según el modelo de propagación	84
Tabla 21. Pérdidas de trayecto en la banda de 2.4 Ghz	87
Tabla 22. Resultados del presupuesto del radio enlace	89

ACRONIMOS

AM	Amplitude Modulation (Modulación en Amplitud)
API	Application Programming Interface (Interfaz de Programación de Aplicación)
AWS	Advanced Wireless Services (Servicios Inalámbricos Avanzados)
BER	Bit Error Rate (Tasa de Error de Bit)
BRAN	Broadband Radio Access Networks (Redes de Acceso Radio Banda Ancha)
BS	Base Station (Estación Base)
CARS	Cable Television Relay Service (Servicio de Televisión por Cable)
CGIS	Canadian Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica Canadiense)
COM	Component Object Model (Modelo de Objetos de Componentes)
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (Acceso Múltiple por Detección de Portadora Evitando Colisiones)
DEM	Digital Elevation Model (Modelo de Elevación Digital)
DEMS	Digital Electronic Messaging Service (Servicio de Mensajería Electrónica Digital)
DLL	Dynamic Linking Library (Librerías de Enlace Dinámico)
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa)
Eb/No	Energy per bit to noise power spectral density ratio (Relación Energía por Bit a Densidad Espectral de Potencia de Ruido)
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva)
ERP	Extend Rate Phy (Nivel Físico de Velocidad de Transmisión de Datos Extendido)
ESRI	Environmental Systems Research Institute (Instituto de Investigación en Sistemas Ambientales)

ETSI	European Telecommunications Standards Institute (Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo)
EURO-COST	European Cooperative for Scientific and Technical Research (Cooperativa Europea para la Investigación Científica y Técnica)
FCC	Federal Communications Commission (Comisión Federal de Comunicaciones)
FDD	Frequency Division Duplex (Duplexación por División en Frecuencia)
FM	Frequency Modulation (Modulación en Frecuencia)
FRA	Fixed Radio Access (Acceso Radio Fijo)
FTP	File Transfer Protocol (Protocolo de Transferencia de Archivos)
FWA	Fixed Wireless Access (Acceso Inalámbrico Fijo)
GIS	Geographic Information System (Sistema de Información Geográfico)
ISM	Industrial, Scientific and Medical (Industrial, Científica y Médica)
ITFS	Instructional Television Fixed Service (Servicio Fijo de Televisión Educativa)
ITU	International Telecommunications Union (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
LMDS	Local Multipoint Distribution Service (Sistema de Distribución Local Multipunto)
LMSC	Lan Man Standards Committee (Comité de Estándares IEEE 802 LAN/MAN)
LOS	Line of Sight (Línea de Vista)
LUNR	Land Use and Resource Information System (Sistema de Información de Recursos y Uso del Terreno)
MAC	Medio Access Layer (Acceso al Medio)
MDS	Microwave Distribution System (Sistema de Distribución de Microondas)
MLMIS	Minnesota Land Management Information System (Sistema de Información de Gestión del Terreno de Minnesota)
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service (Sistema de Distribución Multipunto Multicanal)
MIMO	Multiple Input – Multiple Output (Múltiple Entrada Múltiple Salida)
NLOS	Not Line of Sight (sin línea de vista)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Múltiplexación por División de Frecuencia Ortogonal)

OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal)
PIOS	Polygon Information Overlay System (Sistema de Información de Superposición Poligonal)
PL	Path Loss (Pérdidas del Trayecto)
PMP	Point to Multipoint (Punto a Multipunto)
POTS	Public Old Telephone Service (Servicio de Telefonía Pública)
PTP	Point to Point (Punto a Punto)
RAP	Radiated Apparent Power (Potencia Radiada Aparente)
RITL	Radio in the Loop (Radio en el Bucle)
RLB	Radio Link Budget (Presupuesto ó Balance del Enlace)
RUP	Racional Unified Process (Proceso Unificado de Desarrollo)
S/N	Signal to Noise Ratio (Relación Señal a Ruido)
SUI	Stanford University Interim Models (Modelos Empíricos de la Universidad de Stanford)
TDD	Time Division Duplexing (Duplexación por División en Tiempo)
TDM	Time Division Multiplexing (Multiplexación por División en el Tiempo)
TDMA	Time Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División en el Tiempo)
TIA	The Telecommunications Industry Association (Asociación de la Industria de las Telecomunicaciones)
TIN	Triangulated Irregular Network (Red Irregular Triangulada)
TWT	Traveling WaveTube (Tubo de Ondas Progresiva)
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure (Infraestructura de Información Nacional No Licenciada)
VBA	Visual Basic® for Applications (Visual Basic para Aplicaciones)
VBE	Visual Basic Editor (Editor de Visual Basic)
VoIP	Voice over Internet protocol (Protocolo Voz sobre IP)
VPN	Virtual Private Network (Red Privada Virtual)
WCS	Wireless Communication Services (Servicios de Comunicación Inalámbricos)
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access (Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas)
WLL	Wireless Local Loop (Bucle local Inalámbrico)

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de acceso inalámbrico fijo representan hoy en día una alternativa viable para el despliegue de redes de telecomunicaciones con múltiples servicios en lugares de poca accesibilidad, donde se dificultaría la implantación de los sistemas de comunicación cableados convencionales. Es por esto que este tipo de sistemas han sido precursores en la introducción de servicios de telecomunicaciones en zonas que anteriormente se encontraban aisladas, impactando de manera positiva el desarrollo de las sociedades de dichas zonas y disminuyendo considerablemente la exclusión digital.

Sin embargo a pesar de la importancia de estos sistemas de comunicaciones, existen algunos inconvenientes relacionados a su diseño y planificación que determinan el cumplimiento de objetivos de calidad óptimos. Uno de los inconvenientes encontrados se refiere al cálculo de las pérdidas de propagación de la señal electromagnética, en donde el aporte más significativo lo dan las pérdidas de trayecto. Es por esto que existen diferentes modelos de propagación, que con diferentes parámetros de entrada, buscan predecir el valor de las pérdidas de trayecto, las cuales se utilizarán para el cálculo de la potencia recibida, el margen de desvanecimiento y finalmente la disponibilidad del trayecto de propagación, siendo este último término un indicativo de la calidad del sistema.

Por otro lado la utilización de algunos modelos de propagación requiere datos de terreno, para lo cual comúnmente se emplea un Sistema de Información Geográfico que permite la captura, manipulación y geoprocesamiento de información georeferenciada, que servirá como insumo al modelo.

En este contexto se propuso el siguiente trabajo de grado encaminado a desarrollar una herramienta para el diseño y planificación de Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo en entornos rurales, soportada en las funcionalidades de un Sistema de Información Geográfico, y que haga uso de diferentes modelos de propagación adecuados para el cálculo de las pérdidas de trayecto que son aplicables a las tecnologías actuales.

Con el propósito de desarrollar a plenitud este trabajo de grado, se ha elaborado el presente documento, cuya estructura se dispuso de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se estudia el contexto tecnológico actual de los sistemas de acceso inalámbrico fijo, referido hacia su importancia en el despliegue de redes de telecomunicaciones, los servicios que este sistema puede ofrecer y las bandas de operación reconocidas para su funcionamiento. Además se hace una descripción del proceso de diseño a partir de una arquitectura general, que permite visualizar los factores más importantes e influyentes en un presupuesto de radioenlace ó balance de enlace.

En el capítulo 2, con el fin de seleccionar los modelos de propagación a utilizar para el desarrollo de la herramienta, se hace un estudio de diferentes modelos empleados actualmente en el diseño de sistemas de acceso inalámbrico fijo y se realizan dos casos de estudio que permiten evaluar su comportamiento y tomar apreciaciones acerca de su utilización.

El capítulo 3 contiene la descripción general de un Sistema de Información Geográfico, sus funcionalidades y aplicaciones, y describe la arquitectura general del Sistema de Información Geográfico ArcGIS Desktop, en el cual se soporta la herramienta software desarrollada en este trabajo de grado. Finalmente se proponen los requerimientos funcionales que deberá cumplir la herramienta software para alcanzar los objetivos del proyecto.

En el capítulo 4 se realiza un ejercicio de verificación que permite poner a prueba la herramienta software en sus distintas funcionalidades, mostrando los resultados gráficos y numéricos obtenidos al calcular las pérdidas de trayecto por los diferentes modelos de propagación implementados. Además incluye los resultados obtenidos del presupuesto ó balance del radioenlace para el trayecto de propagación analizado.

En el capítulo 5 se documentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo de grado y se proponen algunas ideas para trabajos futuros orientados hacia las mismas iniciativas de este proyecto.

Como anexo a este documento, se entrega la documentación del proceso de diseño seguido para el modelado de la herramienta. Además se aporta una completa guía de instalación y uso, donde se explica la forma de utilizar todas las funcionalidades que esta posee.

1. SISTEMAS FWA

1.1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE ACCESO INALÁMBRICO FIJO

Las tecnologías de telecomunicaciones inalámbricas han evolucionado a lo largo del tiempo debido a muchos factores, siendo los más influyentes: la creación y demanda de nuevos servicios y los avances tecnológicos, que permiten y soportan la prestación de dichos servicios.

Dentro de los avances tecnológicos influyentes, se da el primer paso con la invención de la radio, cuya autoría es discutida entre tres grandes físicos: Guillermo Marconi (quien logró la patente en 1897 ante el Reino Unido), Aleksandr Stepánovich Popov (quien presentó la radio ante la Sociedad Rusa de Física y Química en 1895) y Nikola Tesla (quien elaboró equipos similares a los de Marconi 15 años antes y por ello el tribunal de los Estados Unidos le asignó la patente legítima en 1960), quienes hicieron desarrollos similares en diferentes momentos y en distintos lugares orientados hacia la transmisión de ondas de radio y la construcción de los primeros equipos receptores.

Otro aporte a las comunicaciones inalámbricas lo realizó Lee DeForest en 1906 con la válvula electrónica llamada “audiófono” ó tubo de vacío que realizaba la amplificación necesaria para producir una portadora que al ser modulada transmitía voz y música. Después de algunas modificaciones, por medio de ese circuito amplificador de tensión se logró transmitir, recibir y amplificar por primera vez señales de radio moduladas. En 1910 las transmisiones con portadora modulada dieron inicio a la utilización del espectro electromagnético de una manera intensa. En el siglo XX existieron variados sistemas de comunicaciones para uso comercial y militar, especialmente los marítimos. En 1920 se estableció la primera estación de radiodifusión basada en modulación en amplitud (AM, *Amplitude Modulation*) en Pensilvania, y también se implementó el primer sistema de radio móvil que tenía su uso en el departamento de Policía y de Bomberos.

En 1933 Edwin Armstrong desarrollo un sistema de radio de alta calidad, con mayor inmunidad al ruido que la conseguida en AM, haciendo uso de la modulación en frecuencia (FM, *Frequency Modulation*).

Después en 1936 apareció por primera vez la televisión, que tuvo un gran despliegue luego de la segunda guerra mundial. En 1947 se inventa el transistor en los laboratorios Bell de Estados Unidos, que reemplazaría a los tubos de vacío, y con los cuales se lograron construir los primeros receptores de radio transistorizados en 1957. Las comunicaciones satelitales se iniciaron a finales de 1950 con el lanzamiento de los satélites americanos y rusos, satélites geoestacionarios para la transmisión de tráfico de video, datos, y audio. Por otro lado el concepto de telefonía celular fue generado en 1947, aunque la primera implementación de estos sistemas se dio a comienzos de 1971, con la primera red pública de telefonía móvil (Generación 0).

Los sistemas inalámbricos fijos fueron diseñados inicialmente para dar comunicación de un punto terminal fijo a otro, lo que se conoció como comunicación Punto a Punto (PTP, *Point to Point*). Enseguida, debido a los sistemas de radiodifusión, se introdujo el concepto de comunicación Punto a Multipunto (PMP, *Point to Multipoint*), siendo la televisión un sistema de este tipo.

Posteriormente, gracias a la invención de dispositivos como el magnetrón, el amplificador Klistrón y el Tubo de Ondas Progresiva (TWT, *Traveling WaveTube*) fue posible la utilización de las frecuencias más altas (bandas UHF y SHF), las cuales se denominaron "microondas" por su reducida longitud de onda. En la década de los 80, posterior a la implementación de los primeros sistemas de difusión en los Estados Unidos, se comenzó a utilizar la banda de microondas de los 2 Ghz en un sistema PMP, el cual cumplía la función de red de acceso inalámbrica hacia abonados fijos, ó Sistema de Acceso Inalámbrico Fijo (FWA, *Fixed Wireless Access*). Seguido a esto se ofreció el servicio de manera bidireccional, y se amplió el ancho de banda incursionando en la banda de los 3 Ghz. Este primer servicio se conoció con el nombre de Sistema de Distribución Multipunto Multicanal (MMDS, *Multichannel Multipoint Distribution Service*).

La necesidad de un mayor ancho de banda motivó la utilización de la banda de 23-25 Ghz en lo que se denominó el Sistema de Distribución Local Multipunto (LMDS, *Local Multipoint Distribution Service*). Este sistema fue muy similar al MMDS pero con adecuaciones en el nivel físico para soportar las nuevas condiciones de operación en la nueva banda de frecuencias.

Los sistemas PTP con microondas, por su lado, permitieron comunicaciones a gran distancia con alta calidad. Otro medio utilizado para las comunicaciones a

gran distancia fue el cable coaxial aunque las microondas eran mucho más económicas, flexibles, de rápido despliegue y con menores pérdidas en grandes distancias. Hoy en día se tiene que la incursión de la fibra óptica, para las comunicaciones a gran distancia, es muy notable por su alta capacidad de transmisión y muy bajas pérdidas de señal, por lo cual compite en algunos escenarios con los sistemas de microondas.

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC¹, *Federal Communications Commission*) ha reconocido la importancia de las microondas en los sistemas de transmisión y por ello ha asignado las bandas de frecuencia de 2.4 y 11 Ghz para los sistemas inalámbricos fijos de banda ancha con operación de portadora común. Otros servicios como los sistemas de radio industriales privados, servicios públicos y empresas de transporte, entre otros, fueron asignados en otras bandas de microondas.

Actualmente la tecnología de los sistemas de acceso inalámbrico fijo está en constante innovación y desarrollo con sistemas que operan en las bandas de 35 y 42 Ghz, lo cual sumado a las nuevas técnicas de modulación adaptativa y de detección y corrección de errores, se han traducido en un gran ancho de banda disponible para el soporte de nuevos servicios.

1.1.1 Definición de un Sistema FWA: Los sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo cuentan con muchos sinónimos, entre ellos se encuentran: Bucle local Inalámbrico (WLL, *Wireless Local Loop*), Radio en el Bucle (RITL, *Radio in the loop*) y Acceso Radio Fijo (FRA, *Fixed Radio Access*). Sin embargo, todos ellos se refieren a la conexión inalámbrica de último kilómetro en una red de telecomunicaciones mediante la cual se ofrecen servicios a un determinado usuario residencial ó empresarial. Por otro lado los sistemas FWA tienen gran importancia hoy en día por las ventajas que representan para las empresas de telecomunicaciones, principalmente porque permiten el despliegue de una red de una forma rápida, flexible, con bajos costos y con la posibilidad de ofrecer múltiples servicios.

La forma de comunicación predominante en un sistema FWA es la de Punto a Multipunto (PMP), pareciéndose en este sentido a las redes de telefonía celular convencionales, sin embargo con ciertas particularidades por el hecho de que sus terminales son fijos: en primer lugar, se tiene que las estaciones de usuario pueden ser de mayor tamaño y consumo, y por otro lado pueden funcionar a

¹ <http://www.fcc.gov/>

frecuencias más altas (situación en la que se puede requerir línea de vista). Estos dos aspectos pueden significar, dependiendo de la situación, un ancho de banda de usuario considerable para aplicaciones con mayores requerimientos.

Los sistemas FWA se componen de una arquitectura genérica, mostrada en la figura 1, donde se identifican estaciones base, terminales cliente y una central de conmutación que se conecta con las estaciones base mediante una red de transmisión (fibra óptica ó radio):

- Las estaciones base constituyen los elementos de red que se conectan a las redes públicas ó privadas con diferentes tipos de interfaces: IP, ATM, etc. También cuentan con la interfaz para la red de acceso inalámbrica.
- Los equipos terminales de cliente son aquellos elementos de red donde se conectan los diferentes abonados, por lo tanto un mismo terminal puede dar servicio a un gran número de abonados, por lo cual cuentan con diversas interfaces hacia los usuarios: circuitos dedicados E1/T1, circuitos dedicados de $n \times 64$ Kbps, 10/100 baseT y conexiones para el servicio de telefonía pública (POTS, *Public Old Telephone Service*). Con el fin de aumentar la disponibilidad del sistema FWA es común encontrar que a un mismo equipo terminal de usuario se encuentren asociadas dos estaciones base.

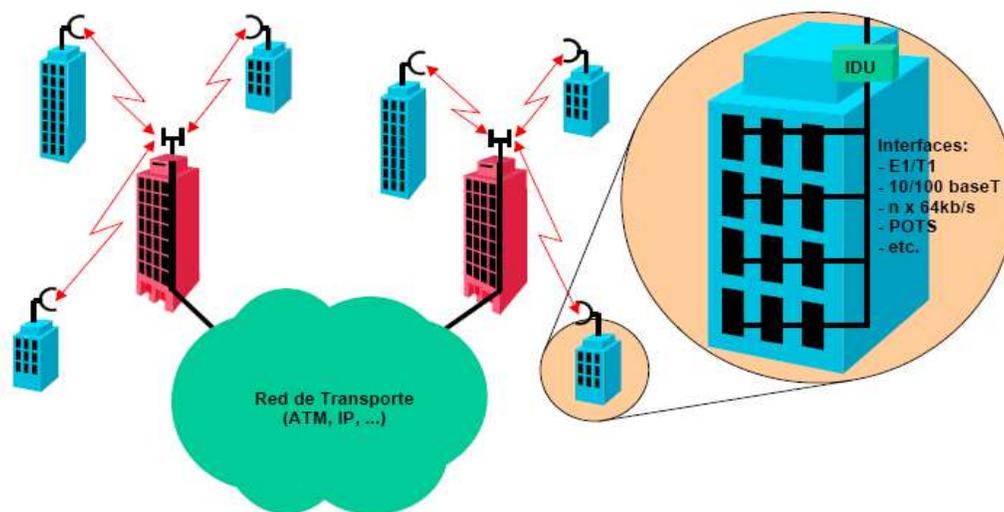


Figura 1. Arquitectura de un sistema FWA.

La zona de cobertura de una estación base está dividida en sectores, para lo cual se emplea la técnica de reutilización de frecuencias soportada en la alta directividad de las antenas utilizadas, como se muestra en la figura 2. Además en cada uno de estos sectores se dispone de una portadora, y en algunos casos que

así lo requieran se puede tener a disposición más de una portadora para aumentar el ancho de banda ofrecido.



Figura 2. Zona de cobertura de una estación base.

Los servicios ofrecidos por un sistema de comunicaciones inalámbrico están variando constantemente en función de las necesidades de los usuarios: individuales, gubernamentales, empresariales, etc., lo cual a su vez ha significado la renovación de estándares y tecnologías en plazos de tiempo muy cortos para adaptarse a los nuevos requerimientos de la demanda, que cada vez tiene mayores exigencias y expectativas de servicio. Los servicios de un sistema de comunicaciones inalámbrico de banda ancha fijo se pueden clasificar de manera general en: servicios e Internet para el público en general (debido principalmente al auge que tuvo Internet en la década de los 90, y por lo cual ahora es considerado un servicio básico) y enlaces de datos de alta velocidad de tipo privado para negocios pequeños, medianos y grandes (generalmente de tipo PTP).

Dentro de los servicios que puede soportar un sistema FWA se encuentran:

Servicio de Telefonía Pública (POTS): Este servicio se ofrece con facilidad puesto que requiere poco ancho de banda y además los estándares proveen mecanismos que garantizan el máximo retardo admisible

Internet: Este servicio es el más común en los sistemas FWA. Al compartir el canal con otros servicios, generalmente se le asigna el ancho de banda sobrante ó no utilizado, variando su capacidad desde 256 Kbps hasta 4 Mbps, dependiendo de la situación. Dentro de este servicio se cuenta: correo electrónico (*email*), búsquedas en la red (*web browsing*), descargas y transferencias de Archivos (FTP, *File Transfer Protocol*), flujos de audio (*audio streaming*) ó conexiones de audio en

tiempo de real, flujos de video (*video streaming*) ó conexiones de video en tiempo de real y Voz sobre IP (VoIP, *Voice over Internet Protocol*).

Servicios interactivos: Se pueden soportar siempre y cuando su ancho de banda requerido no sea excesivo. De cualquier forma este servicio no se ofrece directamente por el operador de telecomunicaciones puesto que en realidad es un servicio final.

Varios (videoconferencia, Red Privada Virtual (VPN, *Virtual Private Network*), PTP): Servicios ofrecidos por los sistemas FWA sin ninguna restricción.

Televisión: Este servicio presenta algunas dificultades para su prestación por el ancho de banda requerido por cada canal de televisión. Además en sistemas sectorizados, se requiere de un número de portadoras igual al número de canales televisivos en cada sector, lo que representaría grandes recursos electromagnéticos en la totalidad de la red.

1.1.2 Bandas de Frecuencia: La Unión Internacional de Telecomunicaciones² (ITU, *International Telecommunications Union*) es el organismo mundial encargado de realizar las divisiones del espectro electromagnético, sin embargo cada país es libre de adoptar estas recomendaciones según su situación. El espectro de frecuencias disponible para los sistemas inalámbricos fijos de banda ancha puede ser dividido en dos categorías: bandas licenciadas y no licenciadas. Las bandas licenciadas dan cierta garantía de no interferencia debido a las condiciones exigidas a cada operador licenciado para no causar perjuicios por interferencia a los operadores cercanos, además de que cada operador debe tener una eficiencia espectral adecuada que demuestre la necesidad de ocupar una frecuencias en una banda licenciada. Por otro lado las bandas no licenciadas, no requieren licenciamiento del sistema a usar, aunque tienen limitantes en niveles de potencia radiada, esquemas de modulación y canalización, necesarios para causar la mínima interferencia sobre sistemas similares.

A continuación en las tablas 1 y 2 se definen los servicios asignados a cada banda de frecuencia licenciada para sistemas inalámbricos fijos para Estados Unidos y Europa.

² <http://www.itu.int/>

Banda de Frecuencia (Ghz)	Nombre del servicio	Notas
1.7 y 2.1	AWS ³	Bandas destinadas a Servicios Inalámbricos Avanzados
2.150-2.156	MDS1 ⁴	Canal de 6 Mhz para servicios MMDS
2.156-2.162	MDS2	Canal de 6 Mhz para servicios MMDS
2.156-2.160	MDS2A	Canal MMDS de 4 Mhz
2.305-2.320 2345-2360	WCS ⁵	Posible utilización en Servicios de Comunicación Inalámbricos (WiMAX ⁶)
2.500-2.690	MMDS/ITFS ⁷	31 canales de 6 Mhz compartidos entre operadores de ITFS y MMDS.
2.5	-	Banda utilizada para sistemas WiMAX
3.5	-	Banda no usada comercialmente, por estar disponible para uso militar.
3.8-4.2	-	Banda con portadora común para enlaces PTP
4.9	-	Banda destinada a Seguridad pública (Policía, Bomberos, servicio de emergencias)
5.9-7.1	-	Banda con portadora común para enlaces PTP
10.7-11.7	-	Banda con portadora común para enlaces PTP
12.7-13.25	-	Banda CARS ⁸ para servicios de televisión por cable
17.7-18.820	-	Uso compartido entre radiodifusión auxiliar, portadora común, CARS y sistemas PTP fijos privados

³ AWS: Advanced Wireless Services (Servicios Inalámbricos Avanzados)

⁴ MDS: Microwave Distribution System (Sistema de Distribución de Microondas)

⁵ WCS: Wireless Communication Services (Servicios de Comunicación Inalámbricos)

⁶ WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access (Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas)

⁷ ITFS: Instructional Television Fixed Service (Servicio Fijo de Televisión Educativa)

⁸ CARS: Cable Television Relay Service (Servicio de Televisión por Cable)

24.25-25.25	DEMS ⁹	Banda con 5 canales FDD de 40 Mhz con espaciamiento de 800 Mhz
28	LMDS	Bloque A de 1150 Mhz dividido en tres partes: 27.5 – 28.35 Ghz, 29.10 – 29.25 Ghz y 31.075 – 31.225 Ghz. Bloque B de 150 Mhz dividido en dos partes: 31 – 31.075 Ghz y 31.225 – 31.3 Ghz.
38	-	Canales FDD de 50 Mhz en 38.6 – 38.95 Ghz con canales pares en 39.3 – 39.65 Ghz

Tabla 1. Servicios fijos y bandas de frecuencia licenciadas en USA

Banda de Frecuencia (Ghz)	Nombre del servicio	Notas
2.5-2.69	-	Banda poco utilizada por estar reservada para redes de 3G
3.4 – 3.6	-	Espaciamiento dúplex de 50 ó 100 Mhz. En algunos países el límite superior de la banda es de 3.7 Ghz.
3.5	-	Banda utilizable por redes WiMAX
3.8	-	Banda poco utilizada por estar reservada para redes de 3G
3.8 – 4.2	-	Banda pública de alta capacidad para enlaces PTP
5.9 – 7.1	-	Banda pública de alta capacidad para enlaces PTP
7.1 – 8.5	-	Banda pública de mediana y alta capacidad para enlaces PTP de largo alcance
10.15 – 10.65	-	5 canales de 30 Mhz con espaciamiento dúplex de 350 Mhz
10.7 – 11.7	-	Banda pública de alta capacidad para enlaces PTP
12.7 – 13.3	-	Banda pública de baja y mediana capacidad
14.4 – 15.4	-	Operaciones de enlaces fijos de diferentes tipos
17.7 – 19.7	-	Banda pública de baja y mediana capacidad

⁹ DEMS: Digital Electronic Messaging Service (Servicio de Mensajería Electrónica Digital)

21.2 – 23.6	-	Banda pública para enlaces PTP de varios tipos
24.5 – 26.5	-	Banda ETSI de 26 Ghz. Canales FDD de 3.5, 7, 14, 28 y 56 Mhz con espaciamento dúplex de 1008 Mhz. El ancho de un canal varía de un país a otro.
37 – 39.5	-	Banda con portadora común para enlaces PTP

Tabla 2. Servicios fijos y bandas de frecuencia licenciadas en Europa.

A continuación en las tablas 3 y 4 aparecen los servicios asignados a bandas de frecuencia no licenciadas de sistemas inalámbricos fijos de banda ancha en Estados Unidos y Europa.

Banda de Frecuencia (Ghz)	Nombre del servicio	Notas
2.4 – 2.483	ISM	En esta banda operan las redes IEEE 802.11b DSSS y IEEE 802.11g. Evitado por los operadores de WiMAX por la interferencia producida por redes IEEE 802.11
3.65	-	Banda (con algunas restricciones) disponible para el uso de WiMAX. Muchos equipos de 3.5 Ghz funcionan bien en esta banda.
5.15 – 5.35	U-NII	En esta banda operan los sistemas IEEE 802.11a, entre muchos otros estándares propietarios. El ancho de canal es de 20 Mhz. Los límites de potencia aplican para segmentos de esta banda según aplicaciones <i>indoor</i> y <i>outdoor</i> .
5.4	-	Disponible para el uso de WiMAX
5.725 - 5.825	U-NII	Similar a la banda de 5.15 – 5.35 Ghz con la excepción de que esta propuesta únicamente para aplicaciones <i>outdoor</i> con niveles de potencia radiada de hasta 4 vatios.
5.8	-	Disponible para el uso de WiMAX

Tabla 3. Servicios fijos y bandas de frecuencia no licenciadas en USA.

Banda de Frecuencia (Ghz)	Nombre del servicio	Notas
2.4 – 2.483	ISM	En esta banda operan las redes IEEE 802.11b DSSS y IEEE 802.11g. Evitado por los operadores de WiMAX por la interferencia producida por redes IEEE 802.11
5.15 – 5.35	HiperLAN	HiperLAN es el estándar de redes inalámbricas rápidas para Europa, quien usa un estándar de transmisión OFDM similar a IEEE802.11a. Esta banda esta propuesta para operaciones Indoor con niveles de potencia radiada de hasta 200 milivatios
5.4	-	Disponible para el uso de WiMAX
5.725 - 5.825	U-NII	Banda de frecuencias para operaciones outdoor con niveles de potencia radiados limitados a 1 vatio.
5.8	-	Disponible para el uso de WiMAX

Tabla 4. Servicios fijos y bandas de frecuencia no licenciadas en Europa.

1.1.3 Tecnologías utilizadas para FWA: La regulación de telecomunicaciones en la mayoría de los casos se refiere explícitamente a las condiciones de operación mínimas requeridas para que un sistema de telecomunicaciones no cause interferencia ó perjuicios a los sistemas ya existentes, pero no interviene en los detalles de la tecnología empleada para la operación. Este hecho ha permitido que muchos operadores de redes puedan hacer sus propias mejoras y correcciones en sus plataformas tecnológicas con el fin de ofrecer más y mejores servicios, siendo cada vez más competitivos, conduciendo a que en muchos casos no sea conveniente divulgar dichas mejoras puesto que son esfuerzos propios de cada operador. Sin duda en esta libertad tecnológica se ha acumulado un gran potencial que ha permitido junto con la evolución tecnológica lograr mejores desempeños de las redes.

Sin embargo, y a pesar de la situación anteriormente nombrada, pueden existir intentos de estandarización tecnológicos especialmente en zonas de aplicación donde se planea el ofrecimiento de servicios a un gran número de usuarios distribuidos de manera aleatoria. Entre las ventajas que trae la estandarización se encuentran:

- ✓ Muchos fabricantes podrán fabricar dispositivos que cumplan algún estándar de tal forma que los precios individuales disminuyan y sean más asequibles.

- ✓ Los operadores de telecomunicaciones podrán desplegar redes basadas en algún estándar con la certeza de que los terminales de usuario serán económicos y por ello habrá posibilidades de incrementar la base de clientes.

A continuación se detallan algunos estándares provenientes de organizaciones que se han preocupado por el despliegue generalizado de las redes de acceso inalámbricas fijas, sin embargo la mayoría de las especificaciones de los estándares, especialmente aquellas referidas al subnivel Acceso al Medio (MAC, *Medio Access Layer*), no serán necesarias para el proceso de diseño de una red inalámbrica:

- **Estándares IEEE 802.11:** Aquellos generados por el grupo de trabajo IEEE 802.11, el cual hace parte del Comité de Estándares IEEE 802 LAN/MAN (LMSC, *Lan Man Standards Committee*), y que está integrado a la organización IEEE¹⁰.

El estándar **802.11** original surgió en 1997, alcanzando velocidades de 1-2 Mbps y operando en las bandas para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*).

Posteriormente se desarrolló el estándar **802.11b**, el cual se publicó en 1999 y garantiza velocidades de hasta 11 Mbps usando la banda ISM de 2.4 Ghz en los Estados Unidos y en otras partes del mundo. Esta banda cuenta con 3 canales sin solapamiento. Los dispositivos con este estándar limitan su potencia de transmisión al orden de los milivatios y utilizan la técnica de transmisión de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*) para evitar interferencia a otras redes. Para la gestión de los canales por los múltiples usuarios el estándar utiliza el Acceso Múltiple por Detección de Portadora Evitando Colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*).

Por otro lado el estándar **802.11a** también fue publicado en 1999, el cual provee operación inalámbrica en la banda para la Infraestructura de Información Nacional No Licenciada (UNII, *Unlicensed National Information Infrastructure*) en 5 Ghz, usando la técnica de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Esta banda tiene 8 canales libres sin solapamiento y alcanza velocidades

¹⁰ <http://www.ieee.org>

de hasta 54 Mbps. Para la gestión de los canales por los múltiples usuarios también utiliza CSMA/CA. Desafortunadamente, debido a inconvenientes técnicos, de este estándar no se fabricaron muchos productos, sumado a que era incompatible con el estándar 802.11b.

El último proyecto de este grupo de trabajo se denominó **802.11g**, el cual estuvo destinado a incrementar las velocidades de transmisión de datos del proyecto 802.11b hasta 54 Mbps, operando en la banda de 2.4 Ghz y utilizando un Nivel Físico de Velocidad de Transmisión de Datos Extendido (ERP, *Extend Rate Phy*). La versión final del estándar se publicó en junio de 2007 y recoge las modificaciones más importantes sobre la definición original; incluye: 802.11a, b, d, e, g, h, i, j. Otros estándares de este grupo de trabajo (c – f y h – j) son mejoras de servicio y extensiones ó correcciones a especificaciones anteriores. En la actualidad la mayoría de productos son de la especificación b y g y por lo tanto funcionan en la banda no licenciada de 2.4 Ghz.

El proyecto siguiente es el **802.11n** que sube el límite teórico hasta los 600 Mbps y trabaja en las bandas de 2.4 y 5 Ghz. Se espera que el alcance de operación de las redes sea mayor con este nuevo estándar gracias a la tecnología de antenas de Múltiple Entrada Múltiple Salida (MIMO, *Multiple Input – Multiple Output*). Este estándar aún se encuentra en desarrollo.

- **Estándares IEEE 802.16:** Definidos por el grupo de trabajo IEEE 802.16 en accesos inalámbricos de banda ancha, que hace parte del comité LMSC y que está afiliado a la organización IEEE. Este grupo de trabajo se enfocó inicialmente en la definición de estándares para sistemas de banda ancha fijos por encima de los 11 Ghz, especialmente el Servicio de Mensajería Electrónica Digital (DEMS, *Digital Electronic Message Service*) en 24 Ghz, el Sistema de Distribución Local Multipunto en 28 Ghz y la banda de 38 Ghz. Dentro de los propósitos de este grupo se encontraban la expansión y masificación de las redes inalámbricas gracias al bajo costo de los terminales de usuarios certificados.

El estándar introductorio 802.16.2 titulado “Coexistencia de los Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo de Banda Ancha” fue publicado en septiembre del 2001. Posteriormente apareció la publicación en diciembre del mismo año del estándar 802.16 WirelessMAN denominado “Interfaz Aire para Sistemas de Acceso Inalámbricos Fijos” que cubre el rango de 10 a 66 Ghz, el cual define los niveles físicos y MAC de un sistema FWA de banda ancha. Este estándar soporta los dos métodos de duplexación: por división en tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*) y por división en frecuencia

(FDD, *Frequency Division Duplex*). En el primer caso se utiliza una única portadora con un ancho de banda de 28 Mhz y en el segundo caso se necesitaran dos portadoras para los enlaces ascendente y descendente, cada una con un ancho de 28 Mhz. Estos sistemas permiten una modulación y codificación adaptativa en función de las condiciones de propagación de cada terminal de usuario. El esquema de acceso múltiple de los usuarios en el enlace ascendente es Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*). El enlace descendente no tiene esquema de acceso múltiple puesto que solo transmite la estación base, pero opera con Multiplexación por División en el Tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*). Por otro lado en el subnivel MAC se tiene en cuenta el mecanismo de resolución a contiendas por el enlace ascendente en dos casos: cuando existe respuesta a un sondeo de difusión y cuando hay registro de terminales.

Posteriormente el grupo de trabajo extendió la operación de los sistemas del estándar anterior a los rangos de frecuencia entre 2 y 11 Ghz, conociéndose como el estándar 802.16a publicado en abril de 2003. Este estándar soporta sistemas con línea de vista (LOS, *Line of Sight*) y sin línea de vista (NLOS, *Not Line of Sight*), y protocolo PTP y PMP. Esta extensión del estándar emplea el mismo subnivel MAC del 802.16, pero tiene componentes diferentes en el nivel físico, como la utilización de OFDM.

El estándar 802.16d fue una revisión al estándar original 802.16 y al 802.16a para agregar perfiles definidos por la organización WIMAX Forum¹¹, el cual fue aprobado en junio del 2004. Está diseñado para el acceso fijo, emplea OFDM y funciona desde 2.5 Ghz y 3.5 Ghz con licencia y 5.8 Ghz exento de licencia. Este estándar también es conocido como 802.16-2004.

El estándar actual es el IEEE 802.16e ó también conocido como 802.16-2005, puesto que fue aprobado en el 2005. Esta especificación es la extensión al estándar original para el soporte de banda ancha en estaciones nómadas ó móviles. Este estándar usa Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), lo que significa que agrupa subportadoras en subcanales, permitiendo que estos sean asignados a los terminales de usuario según el servicio contratado. Una sola estación cliente puede usar todos los

¹¹ <http://www.wimaxforum.org/>

subcanales dentro del periodo de la transmisión, ó los múltiples clientes podrían transmitir simultáneamente usando cada uno un subconjunto del total de canales.

- **Estándar ETSI BRAN HIPERLAN/2:** Estándar derivado del Comité de Redes de Acceso Radio de Banda Ancha (BRAN, *Broadband Radio Access Networks*), perteneciente al Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (ETSI¹², *European Telecommunications Standards Institute*). Este estándar fue diseñado para proveer una conexión rápida inalámbrica para distintos tipos de redes como por ejemplo: núcleos de red (*backbone*) y redes domésticas. Mediante esta especificación se pueden soportar servicios de transferencia de video, audio y datos con calidad de servicio garantizada.

El estándar define los niveles físicos, de enlace de datos y de convergencia; siendo este último el encargado del soporte de los servicios entre el nivel de enlace de datos y el nivel IP: Adaptación de las solicitudes de servicio de los niveles superiores y conversión de paquetes de niveles superiores al tamaño de la trama en el nivel de enlace de datos.

Cuenta con un nivel físico muy similar a la del estándar 802.11a, empleando modulaciones BPSK, QPSK, 16QAM ó 64QAM, pero con un subnivel MAC diferente usando Acceso Múltiple por División de Tiempo. Opera en la banda de 5 Ghz y soporta velocidades de hasta 54 Mbps. Su primera versión fue publicada en abril del 2000. El alcance típico de los puntos de acceso HiperLAN/2 es de 30 m en interiores, aumentando hasta 150 m en espacios abiertos sin obstrucción

El nivel físico está basado en OFDM, sin embargo, en la actualidad el costo de los sistemas OFDM a 5 Ghz todavía se mantienen bastante altos debido a los requerimientos de linealidad del amplificador de potencia del transmisor y bajo nivel de ruido del amplificador del receptor. Por lo tanto, los componentes basados en el estándar HiperLAN/2 cuestan mucho más que las alternativas de menor velocidad existentes.

Finalmente este estándar permite el acceso inalámbrico a una gran variedad de núcleos de red: IP (Ethernet, PPP, etc.), redes ATM, redes 3G, etc.

¹² <http://www.etsi.org>

- **Estándar ETSI BRAN HIPERACCESS:** Estándar desarrollado por el comité BRAN de ETSI. Es una extensión del estándar HIPERLAN/2 para su operación en modo Punto Multipunto y a velocidades de hasta 25 Mbps en varias clases de redes.

Se diseñó para redes de acceso fijo inalámbrico de banda ancha con aplicaciones multimedia en la banda de 40.5 a 43.5 Ghz. El estándar correspondiente al nivel físico es el ETSI TR 101 999 y el de nivel de control de enlace es el ETSI TR 102 000. Tiene una cobertura de hasta 5 km y se puede utilizar como acceso inalámbrico a redes privadas y públicas en entornos urbanos y rurales, en exteriores para el soporte de servicios a usuarios residenciales y pequeñas ó medianas empresas.

- **Estándar ETSI BRAN HIPERMAN:** Estándar desarrollado por la BRAN de ETSI para la interoperabilidad de accesos inalámbricos de banda ancha en el rango de frecuencias de 2 a 11 Ghz (especialmente en la banda de 3.5 Ghz), con interfaces aire PMP. Es una alternativa al estándar 802.16 y está orientada a usuarios residenciales y pequeños ó medianos negocios, con aplicaciones fijas ó móviles.

Utiliza el estándar 802.16 como punto de inicio, por lo que posee los mismos niveles físico y de enlace de datos, lo cual indica que son tecnologías interoperables. Su enfoque es hacia tráfico IP, aunque también puede soportar tráfico ATM. La especificación tiene varias categorías de servicio, involucra calidad de servicio y seguridad, y cuenta con codificación, modulación y potencia adaptativas. También permite la conectividad en ambientes sin línea de vista. Este estándar soporta los 2 métodos de duplexación: TDD y FDD.

- **Estándar ETSI BRAN HIPERLINK:** Estándar diseñado para distancias cortas (<150 metros) y altas velocidades (hasta 155 Mbps). Un uso típico es la interconexión de redes Hiperaccess, puntos de acceso Hiperlan ó la combinación de estos para formar una red completamente inalámbrica. Un ejemplo de red que integra los estándares Hiperlink, Hiperlan e Hiperaccess se ilustra en la figura 3.

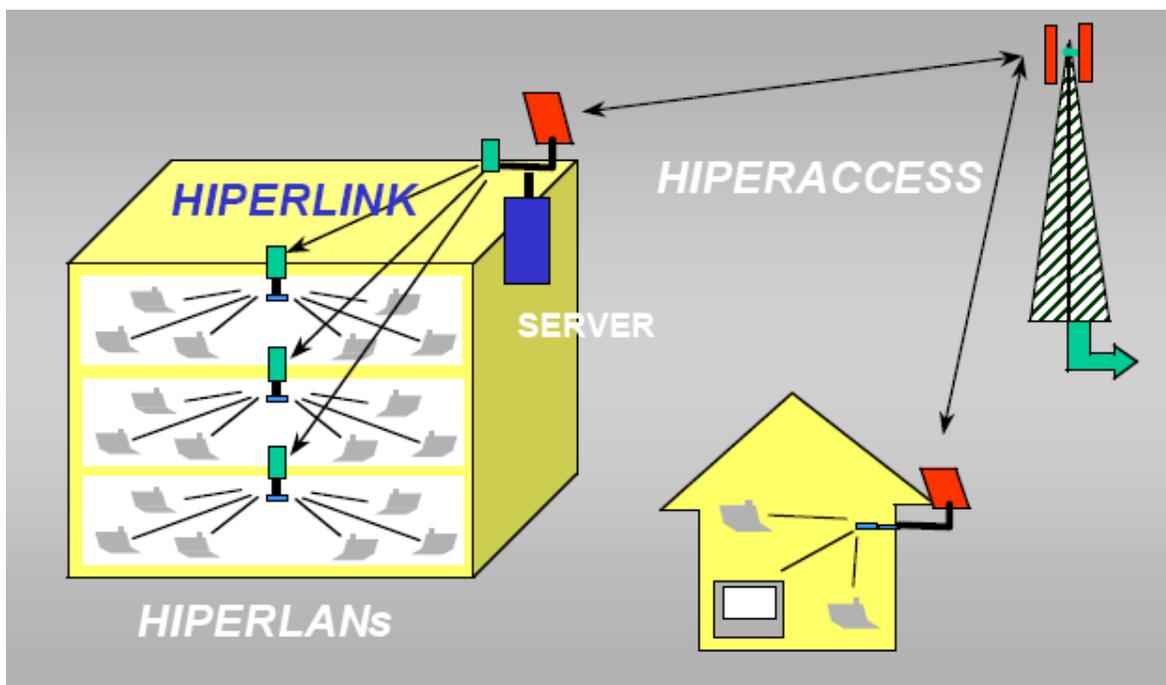


Figura 3. Red inalámbrica con estándares ETSI

1.2 CONFIGURACIÓN GENERAL DE UN SISTEMA FWA

1.2.1 Tipos de redes inalámbricas fijas: Las redes inalámbricas pueden estar configuradas en distintas topologías, a continuación se muestran algunas de ellas:

- **Punto a punto:** En estas redes se conectan solamente dos nodos ó terminales por medio de un canal de datos, en donde los dispositivos se comportan como socios iguales. Este tipo de red es utilizado para conectar sucursales de una empresa que requieren de coordinación para trabajar, interconexión de ciudades, entre otros. En la figura 4 se muestra un enlace punto a punto que utiliza dos repetidores para conectar dos ciudades.

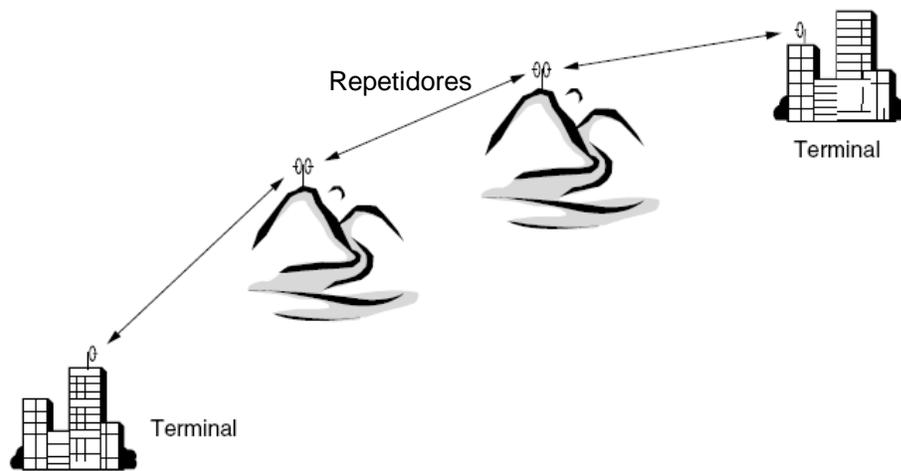


Figura 4. Conexión Punto a Punto [1].

- Punto multipunto:** En este tipo de redes un terminal puede mantener comunicación simultánea con diferentes nodos ó terminales por medio de un canal de datos, cabe notar que en esta red solo hay una línea de comunicación que es compartida por todos los terminales existentes. Para reducir costos esta topología utiliza una estación base (BS, *Base Station*) centralizada que cuenta con una ó varias antenas sectorizadas para manejar diversas zonas al mismo tiempo. En la figura 5 se visualiza una red con esta topología.

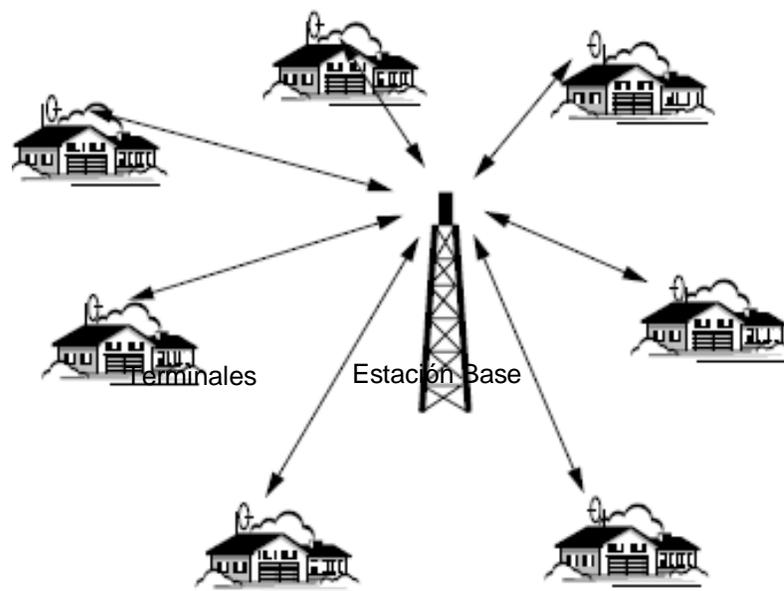


Figura 5. Conexión Punto Multipunto [1]

- **En malla:** En una red en malla existen múltiples conexiones debido a que cada terminal puede comunicarse de forma directa con cualquier terminal perteneciente a la red, donde cada nodo tiene la posibilidad de ser fuente ó destino de información y puede existir el caso en el que un nodo funcione como enrutador de la información hacia otro nodo.

Una red con topología en malla puede operar en dos modos ó algoritmos: distribuida ó centralizada. En el primer modo debe existir una coordinación de todos los nodos para evitar que se presenten colisiones con los datos, ya que las estaciones manejan sus transmisiones enviándolas por un mismo canal, en este modo se hace necesario que se transmitan peticiones a los nodos vecinos para que todos conozcan el algoritmo de planificación y de esta manera evitar que se presenten colisiones. En el segundo modo existe una estación base que se encarga de recibir las peticiones y asignar los respectivos recursos para cada enlace, de esta forma se asegura la no existencia de colisiones.

Las redes en malla inalámbricas se caracterizan por su robustez, topología dinámica, ancho de banda limitado, seguridad y canales de comunicación aleatorios [2]. Dentro de las ventajas de este tipo de red está el incremento de la cobertura y la disminución de costos de instalación, pero uno de sus grandes inconvenientes es la interferencia producida por la transmisión de los nodos vecinos. La figura 6 muestra una red en malla con múltiples saltos, en la cual la información viaja por diferentes nodos:

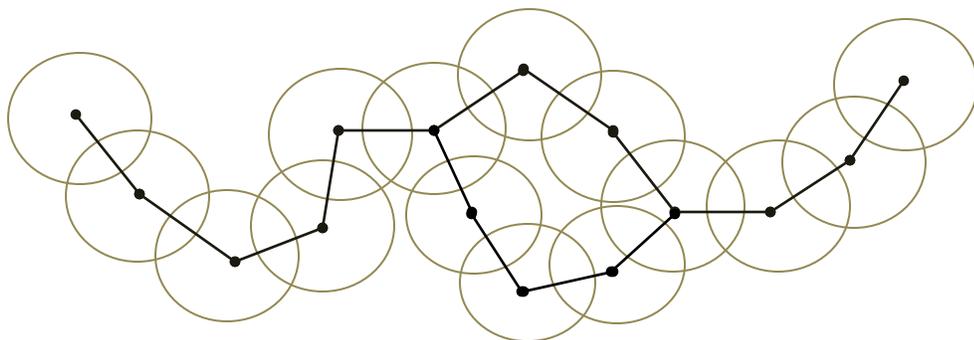


Figura 6. Red en malla [2].

1.2.2 Presupuesto ó balance del enlace: Es el cálculo de las ganancias y pérdidas del sistema a través de las diferentes etapas que constituyen el sistema de telecomunicaciones, desde el transmisor pasando por el medio de propagación hasta el receptor. El cálculo del presupuesto ó balance del radio enlace (RLB, *Radio Link Budget*) es indispensable para realizar un buen diseño y escoger los equipos adecuados.

En este cálculo se distinguen tres elementos: estación transmisora, donde se tiene en cuenta la potencia efectiva de transmisión, la interfaz inalámbrica en donde se producen las pérdidas de espacio libre y por último los usuarios ó la estación receptora, en esta se mide la sensibilidad del receptor. En la figura 7 se pueden apreciar los elementos que intervienen en la definición del presupuesto del radioenlace.

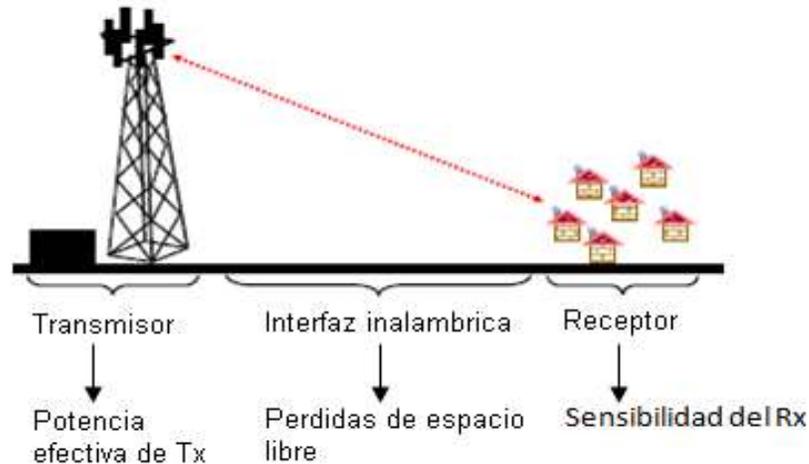


Figura 7. Elementos del presupuesto del enlace.

- **Transmisor:** El terminal transmisor está compuesto por un codificador, modulador, amplificador de potencia, línea de transmisión y la antena, como se muestra en la figura 8.

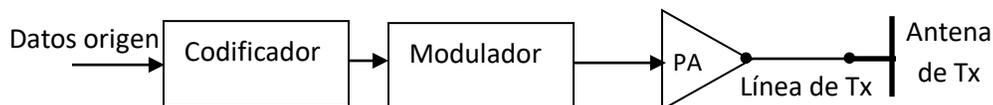


Figura 8. Diagrama de bloques básico del terminal transmisor

En el lado del transmisor se presenta pérdidas en la señal debidas al cable que conecta el transmisor a la antena, estas pérdidas varían dependiendo del tipo de cable que se emplee y la frecuencia de operación, sus unidades

normalmente son dB/m. Para evitar que el cable introduzca mayores pérdidas se recomienda que el cable sea lo más corto posible. Las pérdidas típicas de los cables varían entre 0.1 dB/m hasta 1 dB/m. En la tabla 5 se muestra algunos valores típicos de pérdida en los cables en la banda de 2.4 Ghz:

Tipo de Cable	Pérdida [dB/100m]
RG 58	80-100
RG 213	50
LMR-200	50
LMR-400	22
Aircom plus	22
LMR-600	14
Flexline de 1/2"	12
Flexline de 7/8"	6.6
C2FCP	21
Helix de 1/2"	12
Helix de 7/8"	7

Tabla 5. Valores típicos de pérdida en los cables para la banda de 2.4 Ghz [3].

En la tabla 6 se muestra valores de atenuación para una línea de transmisión de 10 m de longitud a diferentes frecuencias, el símbolo '-' significa que no es usado para esa frecuencia.

En el transmisor también se presenta pérdidas causadas por los conectores, el valor estimado por cada conector es de 0.25 dB, aunque este valor puede variar entre 0.3 y 0.5 dB por conector. Por último los protectores contra descargas que se colocan entre la antena transmisora y el radio introducen una pérdida máxima de 1 dB.

Para compensar las pérdidas ocasionadas por los conectores o para satisfacer el balance del enlace se pueden usar amplificadores, aunque la mejor solución es realizar una adecuada selección de las antenas y un receptor con alta sensibilidad, ya que los amplificadores introducen un ruido extra a la señal.

Tipo línea	2.6 Ghz	3.5 Ghz	5.8 Ghz
dieléctrico de aire de 1/2"	1.49 dB	1.78 dB	2.51 dB
dieléctrico de aire de 7/8"	0.72 dB	0.87 dB	1.21 dB
dieléctrico de aire de 1 5/8"	0.41 dB	-	-
dieléctrico de aire de 2 1/4"	-	-	-
dieléctrico de espuma de 3/8"	1.96 dB	2.34 dB	3.16 dB
dieléctrico de espuma de 1/2"	1.32 dB	1.57 dB	2.13 dB
dieléctrico de espuma de 7/8"	0.76 dB	0.91 dB	-
dieléctrico de espuma de 1 1/4"	0.56 dB	0.67 dB	-
dieléctrico de espuma 1 5/8"	0.48 dB	-	-

Tabla 6. Valores de atenuación debidas al tipo de línea de transmisión [1].

Las antenas tienen una ganancia típica que varía en el rango de 2 dBi si es una antena integrada simple y de 8 dBi si es omnidireccional estándar, hasta 21- 30 dBi si es tipo parabólica. Una inadecuada instalación de la antena puede disminuir la ganancia de esta. En algunos sistemas se hace necesaria la utilización de un *radome*, que es una estructura impermeable que protege la antena de microondas ó radar de factores ambientales como el clima, aves, entre otros. Dicho *radome* reducen la carga que produce el viento a las antenas, estos son hechos de material no conductor y esencialmente transparente, por ejemplo vidrio. Dependiendo de la frecuencia es prudente incluir en el balance del enlace la atenuación en dB debido al *radome* para explicar cualquier atenuación adicional que se presente. En la figura 9 se ilustra las pérdidas en función de la frecuencia que se ocasionan cuando el *radome* esta mojado.

A la salida del transmisor se tiene la Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (EIRP, *Effective Isotropic Radiated Power*) ó PIRE, esta es una medida de potencia que está transmitiendo al espacio y se obtiene restando a la potencia del transmisor (P_{tx}) las pérdidas generadas por el cable (α) y conectores (β) y sumando la ganancia de la antena (G_{aTx}) con relación a una antena isotrópica (ganancia isotrópica), como se puede ver en la ecuación 1.

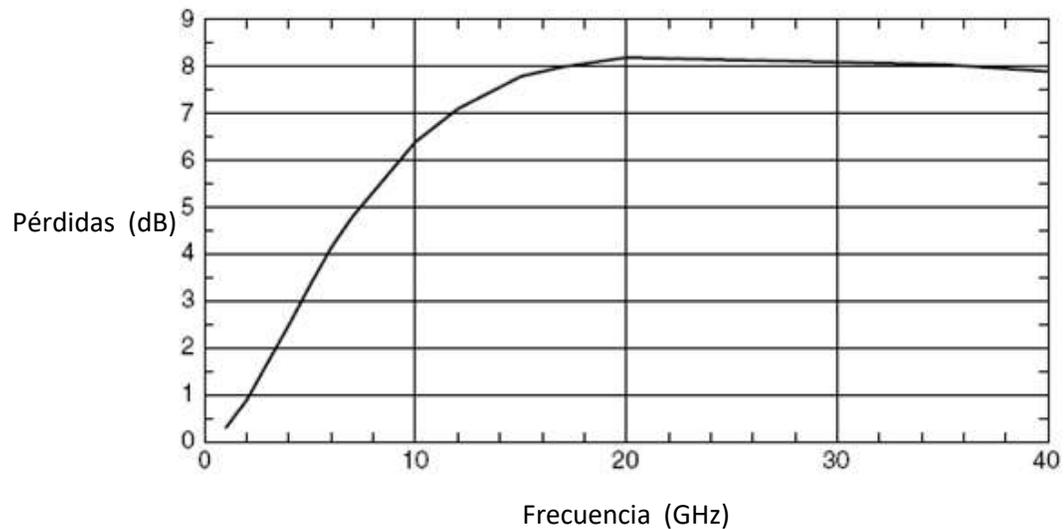


Figura 9. Pérdidas debido al radome.

$$PIRE(dBm) = P_{Tx}(dBm) - \alpha_{Tx}(dB) - \beta(dB) + G_{aTx}(dBi) \quad (1)$$

También se puede obtener con la ecuación 1 la Potencia Radiada Aparente (RAP, *Radiated Apparent Power*) ó PRA, pero la ganancia de la antena (G_{aTx}) debe estar con relación a un dipolo de media onda.

- **Medio:** Las ondas electromagnéticas utilizan la atmósfera terrestre para propagarse, donde existe absorción por la transferencia de energía a los átomos y moléculas del medio. Es en el medio de propagación donde la señal sufre la mayor atenuación. Cuando el medio es el vacío, la señal sufre una atenuación en función de la distancia, llamada pérdida de espacio libre ó pérdidas de friss.

Las pérdidas de espacio libre determinan la atenuación que sufre la señal desde el transmisor hasta el receptor sin tener en cuenta la presencia de obstáculos. Estas pérdidas se pueden calcular por medio de la ecuación 2, donde la frecuencia f esta en Mhz y la distancia d en Km:

$$FSL(dB) = 32.45 + 20\log_{10} f + 20\log_{10} d \quad (2)$$

En la siguiente tabla se realiza una comparación de las pérdidas en el espacio libre a diferentes frecuencias y distancias:

Distancia [Km]	915 Mhz	2.4 Ghz	5.8 Ghz
1	92 dB	100 dB	108 dB
10	112 dB	120 dB	128 dB
100	132 dB	140 dB	148 dB

Tabla 7. Pérdidas de espacio libre [dB] para diferentes distancias y frecuencias [3].

- **Receptor:** El terminal receptor está compuesto por una antena, línea de transmisión, amplificador, demodulador y decodificador, como se muestra en la figura 10.

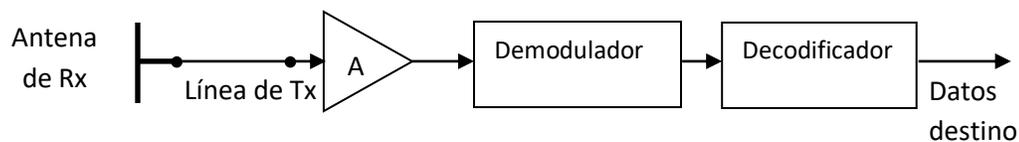


Figura 10. Diagrama de bloques básico del terminal receptor

En el lado del receptor al igual que en el transmisor se tiene en cuenta la ganancia de la antena receptora (G_{aRx}), las pérdidas introducidas por el cable (α_{Rx}). A diferencia del transmisor, en el receptor existe un parámetro de gran importancia llamado sensibilidad del receptor, el cual es el valor mínimo de potencia aceptable que se requiere para decodificar correctamente la información transmitida con una adecuada velocidad de transmisión de datos. Algunos valores típicos de sensibilidad del receptor para tarjetas de red inalámbricas se muestran en la tabla 8, en donde se puede notar que la sensibilidad depende de la velocidad de transmisión de datos.

Tarjeta	11 Mbps	5.5 Mbps	2 Mbps	1 Mbps
Orinoco cards PCMCIA Silver/Gold	-82 dBm	-87 dBm	-91 dBm	-94 dBm
Senao 802.11b card	-89 dBm	-91 dBm	-93 dBm	-95 dBm

Tabla 8. Valores típicos de sensibilidad del receptor para tarjetas de red inalámbricas.

Otro parámetro importante es el margen de desvanecimiento del sistema, que es la diferencia entre el valor de la señal recibida y la sensibilidad del receptor. El sistema necesita que exista un cierto margen de desvanecimiento para garantizar su correcto funcionamiento u operación.

Para medir la relación entre la potencia de la señal de interés y la potencia de ruido en los sistemas analógicos se utiliza la relación señal a ruido (S/N, *Signal to noise ratio*) que es la diferencia en dB entre la potencia de la señal recibida y la potencia del ruido eléctrico presente en el canal. En los sistemas digitales se llama relación energía por bit a densidad espectral de potencia de ruido (E_b/N_0 , *Energy per bit to noise power spectral density ratio*) que está relacionada con la tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*). La señal recibida debe ser superior ó en su defecto igual a la sensibilidad del receptor para establecer el enlace, por otro lado el ruido eléctrico es variable y puede ser de tipo natural ó artificial. Se tiene que un valor típico de S/N para una conexión de 11 Mbps es de 16 dB y para una velocidad de 1 Mbps es de 4 dB. Para calcular la S/N se utiliza la ecuación 3. En la tabla 9 se pueden apreciar algunos valores típicos de relación S/N y E_b/N_0 para una probabilidad de error de 10^{-6} para varios esquemas de modulación [4].

Modulación	Relación S/N (dB)	Relación E_b/N_0 (dB)
BPSK	10.6	10.6
QPSK	13.6	10.6
4QAM	13.6	10.6
8QAM	17.6	10.6
8PSK	18.5	14
16PSK	24.3	18.3
16QAM	20.5	14.5
32QAM	24.4	17.4
64QAM	26.6	18.8

Tabla 9. Comparación de las relaciones S/N y E_b/N_0 para varios esquemas de modulación digital

$$S/N(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Potencia_de_la_señal}[W]}{\text{Potencia_del_ruido}[W]} \right) \quad (3)$$

$$E_b / N_0(dB) = \frac{\frac{S}{R}}{\frac{N}{B_N}} = \frac{S}{N} \frac{B_N}{R} \quad (4)$$

Donde S/N es la relación portadora a ruido, B_N es el ancho de banda de ruido y R es la velocidad de transmisión de datos en bits por segundo.

El margen de desvanecimiento del enlace se calcula con la ecuación 5.

$$\begin{aligned} \text{Margen} = & P_{tx}(dBm) - \alpha_{Tx}(dBm) + G_{aTx}(dBi) - FSL(dB) + G_{aRx}(dBi) \\ & - \alpha_{Rx}(dB) - \text{Sensibilidad de receptor}(dBm) \end{aligned} \quad (5)$$

2. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE UN SISTEMA DE ACCESO INALÁMBRICO FIJO EN UN ENTORNO RURAL

2.1 GENERALIDADES DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN

Un aspecto importante en los sistemas inalámbricos es la forma como se modela el medio de propagación (canal de radio) y el ambiente en el cual se desea implementar un sistema en particular. Con el tiempo el diseño de radio enlaces se ha depurado y se han hecho distintos aportes al tema, los cuales han sido fruto del empirismo y de deducciones físico-matemáticas. Se ha concluido que los factores que más incidencia tienen en un diseño de este tipo son los fenómenos físicos de reflexión y difracción, y los fenómenos atmosféricos de refracción, dispersión y absorción.

La refracción tiene una gran repercusión en los sistemas por encima de 30 Mhz, en los cuales se requiere línea de vista para lograr la comunicación y por ello se debe evaluar la refracción de las ondas al pasar por medios con diferentes índices de refractividad [5]. Por otro lado la reflexión tiene especial importancia en los sistemas por debajo de los 8 Ghz [6], en los cuales la multitrayectoria debido a las múltiples reflexiones de la onda, puede causar una seria atenuación ó desvanecimiento de la señal recibida. La difracción se considera cuando existen obstrucciones en el trayecto de la onda, los cuales pueden ser sobrepasados si la señal incidente es capaz de bordear el objeto y alcanzar al receptor [7]. La dispersión es la división de la señal de radio en varias fracciones con niveles de potencia menor, cuando la señal radio colisiona con un obstáculo grande en comparación con la longitud de onda, en el caso de las comunicaciones inalámbricas puede ser la lluvia, la nieve ó cualquier otro elemento, originando absorción en la señal de radio.

Estos fenómenos tendrán mayor ó menor incidencia en un radio enlace dependiendo de algunas características propias del sistema como la frecuencia y la distancia, pero también existe una gran relación con las características del terreno de propagación. Por ello han surgido algunos modelos de propagación que intentan modelar un terreno irregular para predecir el valor de pérdidas que tendría una señal al pasar por dicho terreno. Los modelos que predicen el valor de la potencia a cualquier distancia de la antena transmisora se los conoce como de “gran escala” y aquellos que profundizan en los cambios rápidos de potencia en distancias cercanas al transmisor, de unas cuantas longitudes de onda, se les llama de “pequeña escala” [8].

Para conocer la viabilidad de los proyectos que se desean desarrollar en lugares específicos, se debe modelar los canales radio teniendo en cuenta el trayecto entre el transmisor y el receptor, así se podrá evaluar los costos y las características de los equipos requeridos. El buen desempeño de los modelos de propagación se determina por la comparación de los resultados obtenidos con medidas de campo reales.

En la aplicación de los modelos de propagación se deben tener en cuenta las especificaciones que el modelo requiere, tales como: tipo de terreno, propiedades eléctricas del suelo, características de la atmosfera, ambiente de propagación (área urbana, suburbana, abierta ó rural), entre otras.

2.1.1 Definición de modelo de propagación: Un modelo de propagación es una representación simplificada y aproximada de la realidad por medio de un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos en función de la frecuencia, la distancia y otras condiciones, usados para representar las características radio de un ambiente en particular.

2.1.2 Clasificación de los modelos de propagación: Dentro de los distintos modelos que cuantifican el valor de las pérdidas del trayecto (PL, *Path Loss*) se diferencian entre ellos en su enfoque, complejidad y precisión. Sin embargo, se puede hacer una clasificación general de los modelos en función de su origen constituyéndose tres grupos: empíricos, semi–empíricos y analíticos [9]. Actualmente existe gran variedad de modelos que se han desarrollado para resolver problemas particulares y en un ambiente de aplicación específico.

En el grupo de los modelos empíricos aplicables a sistemas de acceso inalámbrico fijo se encuentran: el modelo de AT&T, fruto de mediciones en algunas áreas de Estados Unidos para modelar el ambiente fijo de RF, los modelos empíricos de la Universidad de Stanford (SUI, *Stanford University Interim Models*) que aplican

para tres categorías de terreno, el modelo de Okumura-Hata, y el modelo ECC-33 que extrapola el modelo de Hata hasta 4 Ghz, entre otros [10].

En el grupo de los modelos analíticos aplicables a sistemas de acceso inalámbrico fijo, que se caracterizan por la deducción del modelo a partir de principios físicos de radio propagación, se encuentran el modelo geométrico de trazado de rayos en dos dimensiones (2D Ray Tracing Model) conocido como el modelo de Anderson y el modelo de trazado de rayos inteligente en 3D, utilizado en algunas herramientas computacionales para el diseño de redes inalámbricas y radio enlaces [11]. Finalmente los modelos semi-empíricos aplicables a sistemas de acceso inalámbrico fijo son aquellos que surgen de fundamentos físicos pero contienen algunos factores de corrección empíricos. Entre estos últimos modelos se encuentran el de Longley-Rice, de Durkin y el modelo COST231 Walfish-Ikegami [11].

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN

2.2.1 Modelos Empíricos: Los modelos empíricos se desarrollan realizando una serie de mediciones con las cuales se obtienen fórmulas de propagación para el cálculo de las pérdidas del trayecto. A continuación se describen algunos de ellos:

- **Modelo COST 231 Hata:**

Este modelo de propagación fue creado por la Cooperativa Europea para la Investigación Científica y Técnica (EURO-COST, *European cooperative for scientific and technical research*) con el fin de extender el modelo de Hata, que es válido para frecuencias entre 150 y 1500 Mhz, hasta el rango de frecuencia de 2 Ghz para implementar el sistema GSM1800 en Europa [9].

El COST 231 Hata utiliza cuatro parámetros para el cálculo de las pérdidas de propagación, estos son: la distancia entre el transmisor y el receptor d (Km), la frecuencia de operación del sistema f (Mhz), la altura de la antena de la estación base h_b (m) y la altura de la antena de la estación móvil h_m (m). La expresión para las pérdidas básicas de propagación es la siguiente [12]:

$$L_p(\text{urbano})(dB) = 46.3 + 33.9 \cdot \log_{10} f - 13.82 \cdot \log_{10} h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \cdot \log_{10} h_b) \cdot \log_{10} d + CM \quad (6)$$

Donde, CM es un factor de corrección para tomar en cuenta el ambiente de propagación, cuyos valores son:

CM= 0 dB para ciudades medianas y áreas suburbanas.

CM= 3 dB para centros metropolitanos.

El termino $a(hm)$, factor de corrección por la altura de la antena del terminal móvil ó receptor, es tomado del modelo Hata y se define así:

Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(hm)(dB) = (1.1\log_{10} f - 0.7)hm - (1.56\log_{10} f - 0.8) \quad (7)$$

Y para ciudades grandes:

$$a(hm)(dB) = 8.29(\log_{10} 1.54hm)^2 - 1.1dB \quad \text{para } f < 300 \text{ Mhz} \quad (8)$$

$$a(hm)(dB) = 3.2(\log_{10} 11.75hm)^2 - 4.97dB \quad \text{para } f > 300 \text{ Mhz} \quad (9)$$

Para obtener las pérdidas de propagación en áreas suburbanas la ecuación 1 se modifica de la siguiente forma:

$$Lp(suburbano)(dB) = Lp(urbano) - 2[\log_{10}(f / 28)]^2 - 5.4 \quad (10)$$

Y para el cálculo de las pérdidas de propagación en áreas rurales, la ecuación 1 se modifica así:

$$Lp(rural)(dB) = Lp(urbano) - 4.78(\log_{10} f)^2 + 18.33\log_{10} f - 40.94 \quad (11)$$

Para aplicar el modelo COST 231 Hata se deben tener en cuenta los parámetros ó restricciones indicados en la tabla10.

Parámetros	Valor
Frecuencia (f) en [Mhz]	1500-2000
Altura efectiva de la estación base (hb) en [m]	30-200
Altura de la antena del móvil (hm) en [m]	1-10
Distancia (d) en [Km]	1-20

Tabla 10. Parámetros del modelo COST 231 Hata

- **Modelo ECC-33:**

Este modelo fue desarrollado por el Comité de Comunicaciones Electrónicas (ECC, *Electronic Communication Committee*), anteriormente conocido como el Comité Europeo de Radiocomunicaciones (ERC, *European Radiocommunication Comitee*) y es una modificación del modelo Okumura-Hata, que permite ser ajustado y extrapola su aplicación hasta 4 Ghz [10].

El modelo ECC-33 fue adoptado por el IEEE 802.16 WG como modelo de pérdidas del trayecto para el diseño de redes WIMAX [10]. Este modelo es aplicable a ciudades medianas y grandes, además cuenta con correcciones para áreas suburbanas y abiertas. Las pérdidas del trayecto están dadas por la ecuación 12.

$$PL(dB) = A_{fs} + A_{bm} - G_b - G_r \quad (12)$$

Donde, A_{fs} son las pérdidas de espacio libre, A_{bm} son las pérdidas medianas básicas del trayecto, G_b es la ganancia en la estación base y G_r es la ganancia del terminal receptor. Estos términos están definidos así:

$$A_{fs} = 92.4 + 20\log_{10} d + 20\log_{10} f \quad (13)$$

$$A_{bm} = 20.41 + 9.83\log_{10} d + 7.894\log_{10} f + 9.56(\log_{10} f)^2 \quad (14)$$

$$G_b = \log_{10}(h_b / 200) \cdot \{ 13.958 + 5.8[\log_{10} d]^2 \} \quad (15)$$

$$G_r = [42.57 + 13.7\log_{10} f] \cdot [\log_{10} h_r - 0.585], \text{ para ciudades medianas} \quad (16)$$

$$G_r = 0.795h_r - 1.862, \text{ para ciudades grandes} \quad (17)$$

En las anteriores ecuaciones la frecuencia (f) es en Ghz, la distancia (d) es en Km, la altura de la estación base (h_b) y la altura de la antena receptora (h_r) en m.

Para aplicar el modelo ECC-33 se deben tener en cuenta los parámetros indicados en la tabla 11.

Parámetros	Valor
Frecuencia (f) en [Ghz]	< 4
Altura de la estación base (hb) en [m]	20-200
Altura de la antena receptora (hr) en [m]	5-10
Distancia (d) en [Km]	< 10

Tabla 11. Parámetros del modelo ECC-33

- **Modelos Interinos de la Universidad de Stanford:**

Seis modelos desarrollados por la Universidad de Stanford como una solución para la planificación de redes basadas en tecnología WiMAX en una banda de frecuencias de operación de 2.5 Ghz a 2.7 Ghz [13].

Los seis modelos SUI son una extensión del trabajo de AT&T y se dividen en tres tipos de terrenos:

- ✓ Tipo A: es apropiado para colinas pequeñas con fuerte densidad de arboles.
- ✓ Tipo B: es utilizado para colinas grandes con baja densidad de arboles, ó para terreno plano con moderada a fuerte densidad de arboles.
- ✓ Tipo C: se aplica a terrenos planos con baja densidad de arboles.

Los tres tipos de terreno proveen un método más exacto para el cálculo de las pérdidas de trayecto sobre el canal de RF en condiciones de no línea de vista.

En [14] se hace una descripción de los parámetros de los modelos SUI en sus diversos panoramas, SUI-1 a SUI-6. Con la aplicación de los modelos SUI es posible predecir con mayor precisión la cobertura que puede lograr una estación base configurada de diferentes formas, sin lugar a duda esto es una ayuda para el diseño y desarrollo de las redes WIMAX.

Es importante destacar que los modelos SUI no son aplicables para zonas urbanas ó urbanas densas, ya que en la clasificación de los terrenos no hay uno que se adapte a esta zona.

En la ecuación 18 se describe las pérdidas de trayecto con los factores de corrección [15]:

$$PL(dB) = A + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + S, \quad \text{para } d > d_0 \quad (18)$$

Donde, d es la distancia entre la estación base y la antena receptora dada en m, d_0 es una distancia de referencia escogida como 100 m, X_f es la corrección de frecuencia por encima de 2 Ghz, X_h es la corrección para la altura de la antena receptora y S corresponde al efecto de sombra. Los parámetros A , γ , X_f y X_h están definidos a continuación [13]:

$$A = 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right), \quad \text{donde } \lambda \text{ es la longitud de onda en m.} \quad (19)$$

$$\gamma = a - b * h_B + \frac{c}{h_B} \quad (20)$$

Donde, h_B es la altura de la antena de la estación base en m y su rango es de 10 m a 80 m. Las constantes a , b y c son dependientes del tipo de terreno y están definidas en [15].

$$X_f = 6.0 \log_{10}\left(\frac{f}{2000}\right), \quad f \text{ es la frecuencia de interés en Mhz} \quad (21)$$

$$X_h = -10.8 \log_{10}\left(\frac{h_r}{2}\right), \quad \text{para terrenos tipo A y B.} \quad (22)$$

$$X_h = -20.0 \log_{10}\left(\frac{h_r}{2}\right), \quad \text{para terreno tipo C.} \quad (23)$$

La variable S es gaussiana con media en cero y es expresada de la siguiente forma:

$$s = y\sigma \quad (24)$$

Donde y es una variable gaussiana con media cero y con desviación estándar unitaria $N[0,1]$ y σ es la desviación estándar de S , la cual es en si misma una variable gaussiana definida de la siguiente forma:

$$\sigma = \mu_\sigma + z\sigma_\sigma \quad (25)$$

Donde μ_σ es la media, σ_σ es la desviación estándar y z es una variable gaussiana de media cero con desviación estándar unitaria $N[0,1]$. μ_σ y σ_σ son constantes dependientes de cada categoría de terreno y sus valores se indican en [16]

- **Modelo Ericsson:**

Este modelo también llamado modelo 9999 fue desarrollado por Ericsson, basado en el modelo de propagación Okumura-Hata, de gran aceptación y utilización en la industria.

Para el cálculo de las pérdidas entre el transmisor y el receptor este modelo tiene en cuenta las variaciones de elevación del terreno (perfil del trayecto) y algunas características del suelo como: presencia de bosque, campo de uso agrícola y zonas construidas.

El modelo 9999 es aplicable para frecuencias en el rango de 150 Mhz a 2 Ghz y la altura de la antena receptora debe estar entre 1 m y 5 m.

Las pérdidas de trayecto están definidas por [17]:

$$PL_u \text{ (dB)} = a_0 + a_{11} + a_2 \cdot \log_{10} h_b + a_3 \cdot \log_{10} h_b \cdot \log_{10} d - 3.2 \cdot (\log_{10}(11.75h_r))^2 + g(f) \quad (26)$$

d es la distancia entre el transmisor y el receptor dada en Km, f es la frecuencia de operación del sistema dada en Mhz, h_b es la altura efectiva de la antena de la estación base en m y h_r es la altura de la antena de la estación móvil en m.

Donde el término a_{11} y $g(f)$ están dados por las siguientes expresiones:

$$a_{11} = a_1 \log_{10} d, \text{ si } KDFR \leq 6\text{dB} \quad (27)$$

$$a_{11} = a_4 \log_{10} d + (a_1 + a_4) \log_{10} \text{DOB}, \text{ si } KDFR > 6\text{dB} \quad (28)$$

$$g(f) = 44.49 \log_{10} f - 4.78 (\log_{10} f)^2 \quad (29)$$

Los parámetros a_0 , a_1 , a_2 , a_3 y a_4 son constantes y sus valores son: $a_0=32.9$, $a_1=30.7$, $a_2=-12$, $a_3=0.1$ y $a_4=20.7$

Además, DOB es la distancia al punto de obstrucción más alto dada en Km y KDFR es el valor de pérdida por difracción, este último término corresponde al valor de la pérdida adicional debida al terreno, su valor se muestra en la tabla 12.

Terreno	Valor de la atenuación
Área densa urbana	19.0
Área urbana	15.6
Área media urbana	15.6
Área suburbana	8.8
Bosques	13.0
Arbustos	15.0
Cultivos, siembras, huertas	2.9
Vegetación natural	13.0
Salares ¹³	0.0
Desierto, espacio abierto	5.0
Lagos, ríos	0.0
Mar	0.0

Tabla 12. Valores de atenuación debidas al tipo de terreno

- **Modelo de Lee:**

Es un modelo empírico basado en las características del terreno, el cual predice las características de desvanecimiento lognormal de una señal de radiofrecuencia (RF, *Radiofrequency*) en función de la distancia. Los valores calculados por el modelo corresponden al nivel medio de señal para un territorio específico. Este modelo tiene gran popularidad porque sus parámetros son adaptables a nuevos ambientes a partir de datos medidos, como la pendiente de caída de la señal con la distancia. También maneja el concepto de intersección considerándose como el nivel de señal en un punto a una distancia específica desde el transmisor (1 km ó 1 milla generalmente) donde el modelo es válido con las condiciones de referencia y a partir del cual se realizan las demás predicciones [18].

El modelo consta de dos partes:

- ✓ Modelo Punto a Punto, el cual involucra el terreno.
- ✓ Modelo Área a Área, el cual refleja los efectos de las construcciones.

Las condiciones de referencia disponibles para este modelo se indican en la tabla 13.

¹³ Salar: Es un lago superficial en cuyos sedimentos dominan las sales (cloruros, sulfatos, nitratos, boratos, etc). Las sales precipitan por la fuerte evaporación, que a largo plazo siempre es mayor que la alimentación ó entrada de las aguas en la cuenca.

Altura de la antena transmisora	$h_t = 100$ pies (30.5 m)
Altura de la antena receptora	$h_r = 10$ pies (3 m)
Potencia de transmisión	$P_t = 10$ W (40dBm)
Ganancia de la antena de transmisión	$G_{td} = 4$ (6 dBd)
Ganancia de la antena de recepción	$G_{rd} = 1$ (0 dBd)
Frecuencia	$f = 900$ Mhz

Tabla 13. Parámetros de referencia modelo Lee

Cuando existen condiciones diferentes a las de referencia se aplican los siguientes factores de corrección.

$$\alpha_1 = \left(\frac{h_t}{30.5}\right)^2; \alpha_2 = \left(\frac{h_r}{3}\right)^n; \alpha_3 = \left(\frac{P_{tx}}{10}\right); \alpha_4 = \left(\frac{G_{td}}{4}\right); \alpha_5 = \left(\frac{G_{rd}}{1}\right) \quad (30)$$

$$h_r > 10m \rightarrow n = 2$$

$$h_r < 3m \rightarrow n = 1$$

Donde:

h_t es la altura de la estación base (m)

h_r es la altura de la estación móvil (m)

P_{tx} es la potencia transmitida (W)

G_{td} es la ganancia de la antena transmisora

G_{rd} es la ganancia de la antena receptora

Con los anteriores factores se calcula el factor global de corrección α_0 :

$$\alpha_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \quad (31)$$

El nivel de señal recibida promedio (dBm) según este método se calcula con las siguientes fórmulas dependiendo del tipo de ambiente, la distancia entre estaciones d (km) y la frecuencia de operación f (Mhz):

- Zona suburbana:

$$P_r(dBm) = -53.9 - 38.4 \cdot \log d(km) - n \cdot \log\left(\frac{f}{900}\right) + 10 \cdot \log \alpha_0 \quad (32)$$

- Zona urbana (filadelfia):

$$P_r(dBm) = -62.5 - 36.8 \cdot \log d(km) - n \cdot \log\left(\frac{f}{900}\right) + 10 \cdot \log \alpha_0 \quad (33)$$

- Zona urbana (Newark):

$$P_r(dBm) = -55.2 - 43.1 \cdot \log d(km) - n \cdot \log\left(\frac{f}{900}\right) + 10 \cdot \log \alpha_0 \quad (34)$$

- Zona urbana (Tokyo):

$$P_r(dBm) = -77.8 - 30.5 \cdot \log d(km) - n \cdot \log\left(\frac{f}{900}\right) + 10 \cdot \log \alpha_0 \quad (35)$$

El exponente n del término de frecuencia varía según el entorno y la frecuencia, de la siguiente forma:

n=2 para f<450 Mhz y zona suburbana

n=3 para f>450 Mhz y zona urbana

2.2.2 Modelos Semi-Empíricos: Los modelos semi-empíricos están basados en la caracterización más ó menos exacta de las características geográficas del terreno en conjunción de una serie de mediciones, es decir, son una combinación de los modelos empíricos y analíticos, a continuación se describe uno de ellos:

- **Modelo Longley-Rice:**

Este modelo de propagación también es conocido como Modelo de Terreno Irregular (ITM, *Irregular Terrain Model*), el cual se basa en principios electromagnéticos y análisis estadísticos de las características de terreno y de los parámetros del radio enlace, adaptándose a diferentes ambientes: Rural, suburbano y Urbano . Permite operar en dos modalidades: modo de predicción de área que sirve para generar una proyección del área de cobertura de un terminal y el modo punto a punto que sirve para predecir las pérdidas de propagación.

Esta modelo funciona en un amplio rango de frecuencia de 20 Mhz a 20 Ghz, la distancia entre el transmisor y el receptor puede ser entre 1 Km y 2000 Km, las alturas de las antenas es de 0.5 m a 3000 m, tiene en cuenta la polarización horizontal ó vertical y utiliza parámetros del entorno como: variable de terreno irregular Δh (rugosidad promedio) dependiente de la forma del terreno descrito en

la tabla 6, características eléctricas del terreno (permitividad y conductividad) según el tipo de suelo mostrados en la tabla 16 y finalmente refractividad de la superficie (N_s) en función del clima según la tabla 17 [19].

Parámetros del sistema	Valor
Frecuencia	20 Mhz a 20 Ghz
Distancia	1 km a 2000 km
Altura de antenas	0.5 m a 3000 m
Polarización	Horizontal ó Vertical

Tabla 14. Parámetros del sistema modelo Longley Rice

Forma del terreno	Δh (m)
Plano ó superficie del agua	0
Llanura	30
Colinas	90
Montañas	200
Montañas escabrosas	500

Tabla 15. Forma de terreno. Para un nivel promedio usar $\Delta h = 90m$

Tipo de suelo	Permitividad relativa (pF/m)	Conductividad (S/m)
Tierra promedio	15	0.005
Tierra pobre	4	0.001
Tierra buena	25	0.020
Agua dulce	81	0.010
Agua salada	81	5.000

Tabla 16. Valores para las constantes eléctricas del terreno.

Además este modelo considera parámetros de instalación y estadísticos. Los primeros se resumen en el parámetro del criterio de posicionamiento, el cual evalúa el cuidado a tomar en la instalación de cada terminal y tiene tres indicativos: *careful*, *very careful* y *random*. Por otro lado los parámetros estadísticos describen el escenario de una manera estadística, los cuales son: fiabilidad respecto a variabilidad de tiempo, locación y situación. Estos parámetros dependen de las condiciones del terreno y de las características de cada terminal, sus valores se encuentran en el rango: 0.1 – 99.9 % [19].

Clima	Ns (N-unidades)
Ecuatorial	360
Continente subtropical	320
Marítimo subtropical	370
Desierto	280
Continental temperado	301
Marítimo temperado, sobre la tierra	320
Marítimo temperado, sobre el mar	350

Tabla 17. Valores para la refractividad de la superficie (Ns) en función del clima.

La ecuación para el cálculo de la atenuación de referencia es la siguiente:

$$A_{ref} = \begin{cases} \max(0, A_{el} + K_1 d + K_2 \ln(d / d_{Ls})) & d \leq d_{Ls} \\ A_{ed} + m_d d & d_{Ls} \leq d \leq d_x \\ A_{es} + m_s d & d_x \leq d \end{cases} \quad (36)$$

Cada intervalo de esta función corresponde a una situación de propagación específica, existiendo tres rangos de valores: para distancias hasta el horizonte (d_{Ls}) en cuyo caso existirá línea de vista, para distancias más allá del horizonte hasta un punto d_x donde las pérdidas por difracción y dispersión son iguales, y finalmente mas allá de d_x donde se consideran pérdidas por dispersión. Cabe notar que la función de atenuación es continua en los puntos limites donde $d = d_{Ls}$ ó $d = d_x$.

Se tiene que d es la distancia entre los dos terminales: transmisor y receptor. Las funciones: A_{el} , A_{ed} , m_d , A_{es} y m_s , las constates: K_1 , K_2 y las distancias d_x y d_{Ls} de la ecuación 36 se describen completamente en el documento original del algoritmo: "Modelo de Terreno Irregular ITS versión 1.2.2" [20]. A continuación se ilustra de manera general el caso de LOS, siendo este el de mayor interés en el diseño de radioenlaces, para el cual se emplearán los parámetros de entrada: h_{e1} y h_{e2} (alturas efectivas), k (número de ondas), d_L (distancia al horizonte radio) y Z_g (impedancia de transferencia de superficie), cuyo cálculo se detalla en el documento [20].

Caso de LOS:

Para la situación donde existe línea de vista, los coeficientes A_{el} , K_1 y K_2 de la atenuación de referencia se calculan de la siguiente forma:

A_{el} se define como sigue:

$$A_{el} = A_2 + K_1 d_2 \quad (37)$$

Donde:

$$\begin{aligned} d_2 &= d_{Ls} \\ A_2 &= A_{ed} + m_d d_2 \end{aligned} \quad (38)$$

Los valores de A_{ed} y m_d se calculan previamente en el caso de difracción mostrado en [20].

Se tienen dos casos generales:

✓ Cuando $A_{ed} > 0$, se tiene:

$$d_0 = \min\left(\frac{1}{2} d_L, 1.908 \cdot k \cdot h_{e1} \cdot h_{e2}\right) \quad (39)$$

$$d_1 = \frac{3}{4} d_0 + \frac{1}{4} d_L \quad (40)$$

$$A_0 = A_{los}(d_0) \quad (41)$$

$$A_1 = A_{los}(d_1) \quad (42)$$

A_{los} es la función de línea de vista que se detallará más adelante.

Se definen las constantes K'_2 y K'_1 como:

$$K'_2 = \max\left[0, \frac{(d_2 - d_0)(A_1 - A_0) - (d_1 - d_0)(A_2 - A_0)}{(d_2 - d_0)\ln(d_1/d_0) - (d_1 - d_0)\ln(d_2/d_0)}\right] \quad (43)$$

$$K'_1 = (A_2 - A_0 - K'_2 \ln(d_2/d_0))/(d_2 - d_0) \quad (44)$$

Excepto para el caso en que K'_2 sea negativo, las constantes K_1 y K_2 serán:

$$K_1 = K'_1, \quad K_2 = K'_2 \quad (45)$$

Si $K'_1 < 0$ se tiene:

$$K_2 = (A_2 - A_0)/\ln(d_2/d_0) \quad (46)$$

Y si $K_2'' > 0$ se cumple que:

$$K_1 = 0, \quad K_2 = K''_2 \quad (47)$$

En cualquier otro caso se tendrá:

$$K_1 = m_d, \quad K_2 = 0 \quad (48)$$

✓ Cuando $A_{ed} < 0$ se tiene:

$$d_0 = 1.908kh_{e1}h_{e2} \quad (49)$$

$$d_1 = \max(-A_{ed} / m_d, d_L / 4) \quad (50)$$

Si $d_0 < d_1$ se realiza la evaluación de A_0 , A_1 y K'_2 como en el caso anterior. Si $K'_2 > 0$, se evalúa K'_1 y se procede de la misma manera que el caso anterior para hallar las constantes K_1 y K_2 . Si $d_0 > d_1$ ó $K'_2 = 0$, se evalúa A_1 y se define:

$$K''_1 = (A_2 - A_1) / (d_2 - d_1) \quad (51)$$

Si $K''_1 > 0$ se tiene:

$$K_1 = K''_1, \quad K_2 = 0 \quad (52)$$

Y en cualquier otro caso:

$$K_1 = m_d, \quad K_2 = 0 \quad (53)$$

Función $A_{Los}(s)$:

La función A_{Los} se define en la ecuación 54, donde w es un factor de peso, como sigue:

$$A_{Los} = (1 - w)A_d + wA_t \quad (54)$$

$$w = 1 / (1 + D_1 k \Delta h / \max(D_2, d_{Ls})) \quad \text{con} \quad D_1 = 47.7m, \quad D_2 = 10km$$

A_d es la atenuación por difracción definida de la siguiente forma:

$$A_d = A_{ed} + m_d \cdot s \quad (55)$$

A_t es la atenuación por dos rayos definida como sigue:

$$A_t = -20 \log \left| 1 + R_e \cdot e^{i \cdot \delta} \right| \quad (56)$$

Donde se definen los términos δ y δ' de la siguiente forma:

$$\delta = \begin{cases} \delta^{\wedge} & \text{si } \delta^{\wedge} \leq \pi / 2 \\ \pi - (\pi / 2)^2 / \delta^{\wedge} & \text{si } \delta^{\wedge} > \pi / 2 \end{cases} \quad (57)$$

$$\delta^{\wedge} = 2kh_{e1}h_{e2} / s \quad (58)$$

Por otro lado se tiene que R_e es igual a:

$$R_e = \begin{cases} R_e^{\wedge} & \text{si } \dots | R_e^{\wedge} | \geq \max(1/2, \sqrt{\sin \psi}) \\ (R_e^{\wedge} / | R_e^{\wedge} |) \sqrt{\sin \psi} & \text{para cualquier otro valor} \end{cases} \quad (59)$$

Donde R_e' es:

$$R_e^{\wedge} = \frac{\sin \psi - Z_g}{\sin \psi + Z_g} \exp[-k\sigma_h(s)\sin \psi] \quad (60)$$

σ_h es la siguiente función:

$$\sigma_h(s) = 0.78\Delta h(s) \exp[-(\Delta h(s)/H)^{1/4}] \quad (61)$$

Con $H = 16\text{m}$

Y $\sin(\psi)$:

$$\sin \psi = \frac{h_{e1} + h_{e2}}{\sqrt{s^2 + (h_{e1} + h_{e2})^2}} \quad (62)$$

Cabe notar que R_e' es una cantidad compleja debido a que utiliza la impedancia de transferencia de superficie compleja Z_g .

2.2.3 Modelos Analíticos: Estos modelos también son llamados determinísticos debido a que se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio, a continuación se muestran algunos de ellos:

✓ **Método general para uno ó más obstáculos UIT-R 526:**

Este método está incluido en la recomendación UIT-R P.526-6, como procedimiento para el cálculo de pérdidas por difracción en un sistema de comunicación radio operando en frecuencias superiores a 30 Mhz, cuyo trayecto de propagación cuente con uno ó más obstáculos a la propagación con visibilidad directa. La razón de este valor mínimo de frecuencia es garantizar que la longitud de onda de la señal radio sea lo suficientemente pequeña con respecto al obstáculo.

La forma de idealizar los obstáculos en un trayecto de propagación es considerándolos como aristas de grosor despreciable ó como aristas gruesas y lisas con radio de curvatura bien definido. Esta idealización de obstáculos conduce a pensar que los resultados obtenidos por este método serán una aproximación a las pérdidas que efectivamente se obtendrían si se considerara la forma real de los objetos en cuestión.

Este método tiene en cuenta la curvatura de la tierra y es adecuado siempre que se necesite un único procedimiento general para los trayectos terrestres sobre tierra ó mar y tanto en el caso de visibilidad directa como transhorizonte. Para su desarrollo se debe disponer de un perfil de trayecto radioeléctrico que conste de un conjunto de muestras de la altura del terreno sobre el nivel del mar ordenadas en intervalos a lo largo del trayecto, siendo la primera y la última las alturas del transmisor y el receptor sobre el nivel del mar, y un conjunto correspondiente de distancias horizontales desde el transmisor [21]. A cada par de altura y distancia se le llama punto de perfil y se le asigna un índice, incrementándose los índices de un extremo al otro del trayecto. Es preferible, pero no fundamental, que las muestras de perfil tengan la misma separación horizontal.

Este método se basa en un procedimiento consistente en determinar el punto dentro de una sección concreta del perfil con el mayor valor del parámetro geométrico v_n . El valor de v_n para el punto de perfil n-ésimo viene dado por:

$$v_n = h \sqrt{2d_{ab} / \lambda d_{an} d_{nb}} \quad (63)$$

Donde:

$$h = h_n + [d_{an} d_{nb} / 2r_e] - [(h_a d_{nb} + h_b d_{an}) / d_{ab}] \quad (64)$$

h_a, h_b, h_n : alturas verticales
 d_{an}, d_{nb}, d_{ab} : distancias horizontales
 r_e : radio efectivo de la Tierra
 λ : longitud de onda

El segundo término en la ecuación 64 es una buena aproximación a la altura adicional en un punto n debida a la curvatura de la Tierra. Todas las h , d , r_e y λ están en unidades coherentes, es decir pertenecen al mismo sistema de unidades, y corresponden a la siguiente geometría del trayecto de propagación, como se observa en la figura 11.

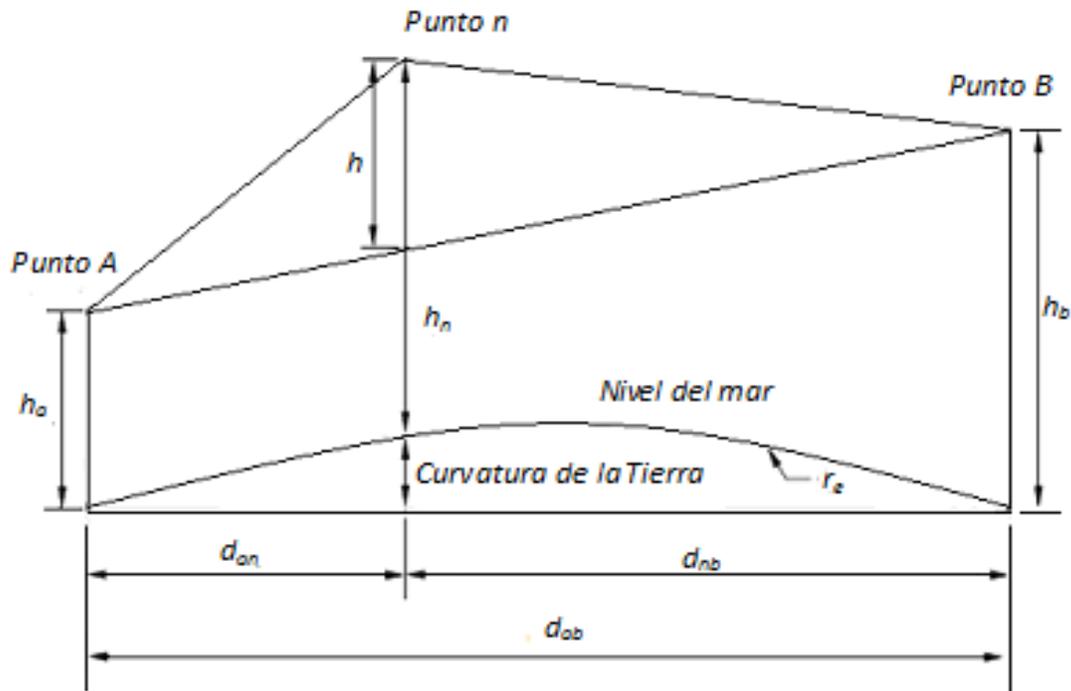


Figura 11. Geometría de un trayecto de propagación

Las pérdidas por difracción serán función de v según la ecuación 65 para los casos donde $v > -0.78$:

$$J(v)(\text{dB}) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad (65)$$

En otros casos la función de pérdidas de difracción se hace cero. Gráficamente las pérdidas por difracción se representan como aparece en la figura 12.

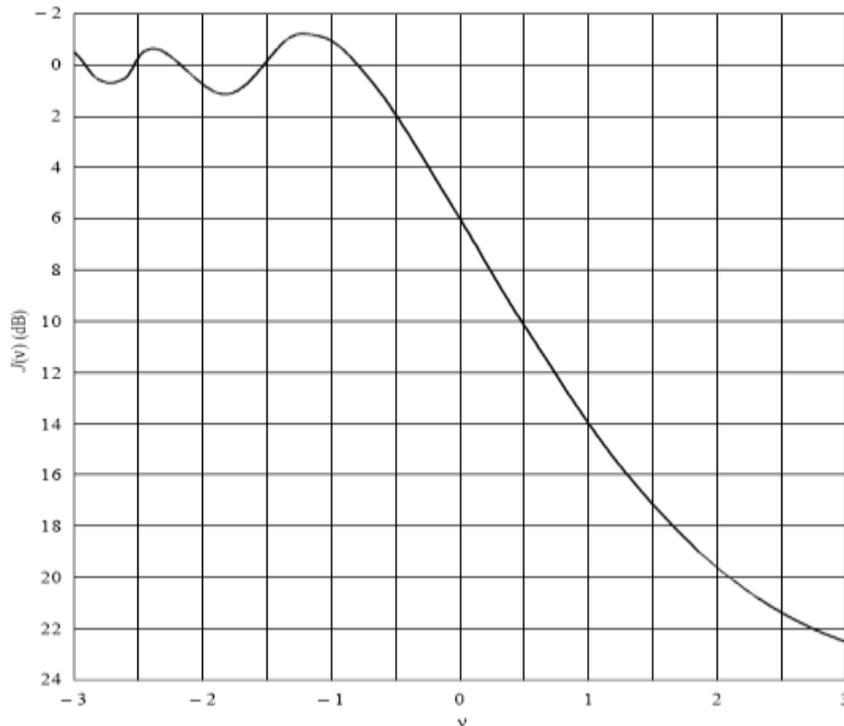


Figura 12. Pérdidas por difracción en función de v [21].

El procedimiento anterior se aplica en primer lugar a todo el perfil del transmisor al receptor. Al punto con el valor más alto de v se le llama arista principal "p" y la pérdida correspondiente es $J(v_p)$. Si $v_p > -0,78$ el procedimiento se aplica dos veces más:

- ✓ Del transmisor al punto p para obtener v_t , y a continuación $J(v_t)$
- ✓ Del punto p al receptor para obtener v_r , y a continuación $J(v_r)$

Finalmente el exceso de pérdidas por difracción en el trayecto de propagación viene dado por:

$$L = J(v_p) + T[J(v_t) + J(v_r) + C] \text{ para } v_p > -0.78 \quad (66)$$

$$L = 0 \text{ para } v_p \leq -0.78 \quad (67)$$

Donde C es el un factor de corrección empírico y D es la longitud total del trayecto (Km):

$$C = 10 + 0,04D \quad (68)$$

$$T = 1 - \exp[-J(v_p)/6] \quad (69)$$

✓ **Método de Epstein Peterson:**

El método Epstein-Peterson permite calcular la pérdida por difracción en un trayecto con dos ó más obstáculos a partir de su descomposición en vanos ó segmentos con un único obstáculo. Dichos subvanos tendrán su inicio y terminación en las antenas ó en alguna de las aristas del trayecto. Solo han de considerarse a efecto de obtener las pérdidas aquellas aristas que interfieran el rayo directo.

En el supuesto mostrado en la figura 13, que presenta un trayecto en el que existen tres aristas, las pérdidas totales por difracción serán la suma de las correspondientes al primer obstáculo considerado en el subvano TX-B, más las correspondientes al segundo considerado en el subvano A-C y las del tercero considerado en el subvano B-RX.

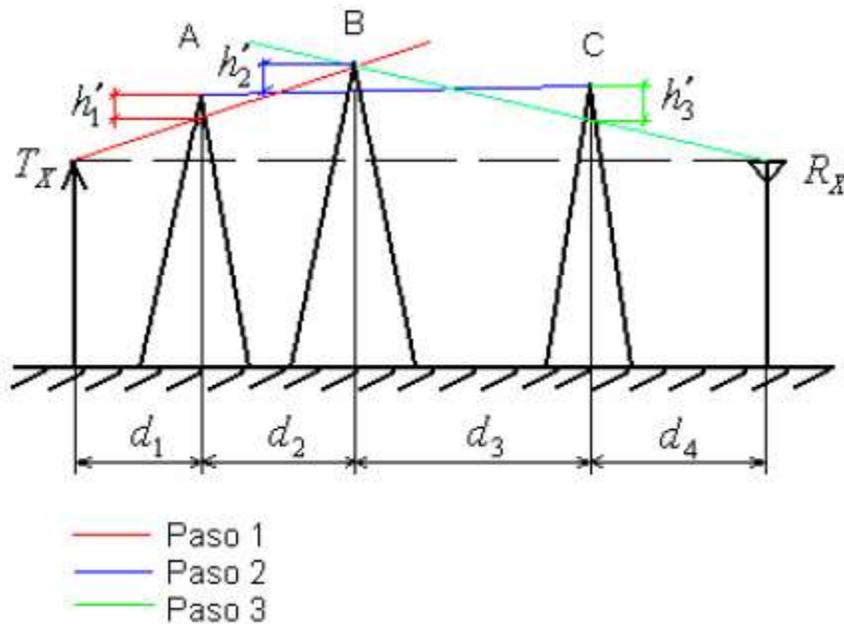


Figura 13. Trayecto de propagación con tres aristas.

En el caso propuesto, las pérdidas por difracción se calculan a partir de las siguientes expresiones:

$$L_{DR} \text{ (dB)} = L_D(v_1) + L_D(v_2) + L_D(v_3) \quad (70)$$

$$v_1 = h_1 \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{d_1 d_2 \lambda}} \quad (71)$$

$$v_2^{\wedge} = h_2^{\wedge} \sqrt{\frac{2(d_2 + d_3)}{d_2 d_3 \lambda}} \quad (72)$$

$$v_3^{\wedge} = h_3^{\wedge} \sqrt{\frac{2(d_3 + d_4)}{d_3 d_4 \lambda}} \quad (73)$$

$L_D(v_i)$ equivale a las pérdidas por la presencia de un único obstáculo según la ecuación 65. Si los pares de aristas están muy próximos, se debe sumar a las pérdidas obtenidas un término de corrección debido a Millington, el cual se calcularía como indica la ecuación 74.

$$L_C = 10 \log \frac{(d_1 + d_2)(d_2 + d_3)}{d_2(d_1 + d_2 + d_3)} \quad (74)$$

Para cualquier otro par de aristas próximas, d_2 representa la distancia entre dichas aristas y d_1 y d_3 las longitudes de los subvanos inmediatamente anterior y posterior. Incorporando este término de corrección, la pérdida total aparece en la ecuación 75.

$$L_{DT} = L_D(v_1^{\wedge}) + L_D(v_2^{\wedge}) + L_D(v_3^{\wedge}) + L_C \quad (75)$$

- **Modelo 2D Anderson:**

El modelo 2D Anderson es aplicable en dos situaciones: LOS y NLOS. En el primer caso utiliza un análisis de reflexión de dos rayos y para el segundo emplea el cálculo de pérdidas de difracción múltiples de Epstein-Peterson asumiendo obstáculos de forma redondeada. Por su precisión este modelo fue adoptado por la Asociación Industrial de Telecomunicaciones¹⁴ (TIA, *The Telecommunications Industry Association*) para la predicción de coberturas e interferencia para sistemas radio móviles en los Estados Unidos.

EL modelo 2D Anderson está diseñado para ser usado en las frecuencias que van desde los 30 Mhz hasta 60 Ghz. Este modelo se basa en los conceptos de la óptica geométrica (trazado de rayos) enfocados hacia la transmisión de ondas electromagnéticas desde un transmisor a un receptor. Además este modelo es extensible a 3D (3 Dimensiones), con el cual se puede tratar el multitrayecto y la dispersión en el tiempo.

¹⁴ <http://www.tiaonline.org/>

Es indispensable determinar si el trayecto de la señal se encuentra ó no en condiciones de línea de vista, por ello se hace una comparación del ángulo de depresión del trayecto entre el transmisor y el receptor (θ_{tr}) con el ángulo de depresión a cada punto de elevación del perfil del terreno (θ_{tp}). El ángulo de depresión relativo a la horizontal entre el transmisor y un punto de recepción en radianes se calcula con la ecuación 76.

$$\theta_{t-r} = \frac{h_r - h_t}{d_r} - \frac{d_r}{2a} \quad (76)$$

Donde

h_t : Es la elevación del centro de la antena transmisora en metros sobre el nivel del mar.

h_r : Es la elevación del centro de la antena receptora en metros sobre el nivel del mar.

d_r : Es la distancia desde el transmisor hacia el receptor en metros

a : Es radio efectivo de la tierra en metros teniendo en cuenta la refractividad atmosférica (K). Con $K = 1.33$ se tiene que a es 8451 Km.

Si $\theta_{tp} > \theta_{tr}$ en al menos un punto de elevación del perfil del terreno, entonces no existe línea de vista (NLOS). Por otro lado si $\theta_{tr} > \theta_{tp}$ para cualquier punto de elevación del perfil del terreno, se garantiza que si existe línea de vista (LOS).

En LOS:

Para situaciones de línea de vista la señal recibida será la suma vectorial del rayo directo y un rayo reflejado. Además si existe obstrucción parcial del 60% de la zona de Fresnel se debe incluir un factor de atenuación adicional de 0 a 6 dB. Por lo tanto este modelo determina que la señal que llega a un sistema de recepción radio está definida por la ecuación 77.

$$E_r \text{ (dBuV/m)} = 76.92 - 20\log(d_r) + P_T - A_{\text{reflection}} - A_{\text{Fresnel}} - A_{\text{clutter}} \quad (77)$$

Donde:

$A_{\text{reflection}}$ es la atenuación debida a la componente reflejada en dB.

A_{fresnel} es la atenuación por la obstrucción parcial de la zona de Fresnel en dB.

$A_{clutter}$ corresponden a las pérdidas en dB debidas al tipo de terreno ó suelo donde se encuentra el receptor, las cuales van de 0 a 17 dB y se encuentran en tablas en [22].

P_t es la Potencia Radiada Aparente (PRA) en dirección del receptor en dBW.

De la ecuación 77 se deducen las pérdidas de trayecto como:

$$L_{LOS} \text{ (dB)} = 32.45 + 20\log f + 20\log d_r + A_{reflection} + A_{Fresnel} + A_{clutter} \quad (78)$$

Areflection:

Para calcular la atenuación debida a la componente reflejada se debe identificar la magnitud de cada rayo: directo y reflejado. La magnitud del rayo directo entre el transmisor y el receptor se determina en la ecuación 79.

$$E_r \text{ (dB}\mu\text{V/m)} = 76.92 - 20\log(d_r) + P_T \quad (79)$$

Donde P_T es la PRA en dBW y d_r es la distancia desde el transmisor hacia el receptor en kilómetros.

La magnitud y la fase de la componente reflejada se calculan partiendo del coeficiente de reflexión complejo como aparece en la ecuación 80.

$$R = R_s g \quad (80)$$

R_s es el coeficiente de reflexión de la superficie y g es el factor de atenuación por la rugosidad de la superficie.

R_s se calcula con las ecuaciones 81 y 82.

$$R_{s\parallel} = \frac{\sin \gamma_0 - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma_0}}{\sin \gamma_0 + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma_0}} \quad \text{Polarización paralela} \quad (81)$$

$$R_{s\perp} = \frac{\epsilon \sin \gamma_0 - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma_0}}{\epsilon \sin \gamma_0 + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma_0}} \quad \text{Polarización perpendicular} \quad (82)$$

γ_0 es el ángulo de incidencia y ϵ es la permitividad compleja dada por :

$$\epsilon = \epsilon_1 - j60\sigma_1\lambda \quad (83)$$

ϵ_1 es la constante dieléctrica relativa y σ_1 (Siemens/m) es la conductividad de la superficie reflejante. λ es la longitud de onda de la radiación incidente.

Polarización vertical es polarización paralela y polarización horizontal es polarización perpendicular. $\sigma_1=0.008$ Siemens/m, $\epsilon_1=15$, $g=1$ son valores usuales para las constantes de la tierra.

Por lo tanto la suma vectorial de las dos componentes de señal, directa y reflejada, será:

$$E_r = E_d \sin(\omega t) + E_d R \sin(\omega t + \Delta\varphi) \quad \text{ó} \quad (84)$$

$$E_r = E_d (1 + |R| \angle(\varphi_r + \Delta\varphi))$$

Donde:

E_d es la magnitud del rayo directo

ω es la frecuencia de portadora en radianes

R es el coeficiente de reflexión compleja

$\Delta\varphi$ es el retardo de fase del rayo reflejado en radianes

φ_r es el ángulo de fase del coeficiente de reflexión.

El retardo de fase se expresa con la ecuación 85.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} \quad (85)$$

Donde Δr es la diferencia en la longitud de los trayectos del rayo directo y reflejado y esta dado por la ecuación 86.

$$\Delta r = \frac{2h_t h_r}{d_r} \quad (86)$$

Donde:

h_t es la altura de la antena transmisora por encima del plano de reflexión

h_r es la altura de la antena receptora por encima del plano de reflexión.

Sin embargo se debe seguir un procedimiento para encontrar el punto de reflexión y el ángulo de incidencia el cual consiste en hallar el punto sobre el perfil del terreno en el cual los siguientes ángulos sean iguales, $\gamma_t = \gamma_r$:

$$\gamma_t = \tan^{-1}[(h_t / d_t)] \quad (87)$$

$$\gamma_r = \tan^{-1}[(h_r / d_r)] \quad (88)$$

Donde:

γ_t es el ángulo de incidencia del transmisor al punto de evaluación

γ_o es el ángulo de incidencia del receptor al punto de evaluación

h_t es la altura de la antena transmisora por encima del punto de evaluación

h_r es la altura de la antena receptora por encima del punto de evaluación

d_t y d_r son las distancias al punto de evaluación desde el transmisor y el receptor respectivamente

Identificado el punto de reflexión se puede calcular por principios geométricos el ángulo de incidencia γ_o con el cual se hallará posteriormente la magnitud y la fase del coeficiente de reflexión a través de las ecuaciones 80, 81 y 82.

Con todos los términos definidos, se puede concluir que la atenuación debida a la componente reflejada es de la forma:

$$A_{reflection} \text{ (dB)} = 20 \log \left[(1 + |R| \angle (\varphi_r + \Delta \varphi)) \right] \quad (89)$$

Con los límites: $6 \text{ dB} < A_{reflection} < 25 \text{ dB}$

Afresnel:

Si en el trayecto de propagación no existen elementos que obstruyan más del 60% de la primera zona de Fresnel, entonces no se realizan modificaciones al nivel de la señal recibida. Pero si se supera este 60%, entonces se debe agregar un factor de pérdidas de 0 a 6 dB según la proporción de la zona de Fresnel obstruida. Este factor de atenuación por obstrucción parcial de la zona de Fresnel se calcula con la ecuación 90.

$$A_{Fresnel} \text{ (dB)} = 6 \left(\frac{C_{obs}(d_p)}{R_{FR}(d_p)} \right) \quad (90)$$

Donde:

C_{obs} : Es la diferencia de altura en metros entre el trayecto del rayo y la elevación del terreno a una distancia d_p .

R_{FR} : Es el 60% del primer radio de Fresnel a una distancia d_p .

Estos valores se calculan teniendo en cuenta el radio efectivo de la tierra usando el factor K.

En condiciones de NLOS:

Esta situación sucede cuando un elemento del perfil del trayecto obstruye el rayo directo entre el transmisor y el receptor, por lo cual se hace necesario el cálculo de unas pérdidas de difracción adicionales. Para el modelo 2D Anderson estas pérdidas se calculan según el método de Epstein Peterson asumiendo “n” obstáculos con forma redondeada.

Según el modelo la intensidad de señal que llega a un terminal receptor en condiciones de NLOS está dada por la ecuación 91.

$$E_r \text{ (dBuV/m)} = 104.77 - 20\log(d_r) + P_T - A_{diff} - A_{T,Fresnel} - A_{R,Fresnel} - A_{clutter} \quad (91)$$

A_{diff} corresponden a las pérdidas de difracción, que corresponde a la ecuación 92.

$$A_{diff} \text{ (dB)} = \sum_{n=1}^n A_n(v, \rho) \quad (92)$$

Donde $A_n(v,p)$ son las pérdidas por difracción para cada obstáculo del perfil del terreno que obstruye el rayo directo entre el transmisor y el receptor, y el procedimiento para su cálculo se muestra en el documento “Reporte sobre metodología independiente tecnológica para el modelamiento, simulación y verificación empírica del desempeño de sistemas de comunicación inalámbricos en sistemas limitados en ruido e interferencia operando en frecuencias entre 30 y 1500 Mhz” [22].

Los términos $A_{T,fresnel}$ y $A_{R,fresnel}$ corresponden a la atenuación por obstrucción parcial de la zona de Fresnel en el trayecto de propagación desde el transmisor hasta el primer obstáculo y desde el último obstáculo al receptor, los cuales se calculan de la misma forma como se cálculo $A_{fresnel}$ en el caso de LOS. Por lo tanto las pérdidas de trayecto serán:

$$L_{NLOS} \text{ (dB)} = 32.45 + 20\log f + 20\log d_r + A_{diff} + A_{T,Fresnel} + A_{R,Fresnel} + A_{clutter} \quad (93)$$

- **Modelo de 2 rayos:**

También conocido como modelo de tierra plana, es un modelo basado en teorías físico ópticas el cual tiene en cuenta la reflexión sobre la superficie de la tierra. Aunque este modelo asume un situación de línea de vista, no es tan idealista como el modelo de pérdidas de espacio libre, por lo cual se constituye en un buen modelo inicial para el análisis de las comunicaciones vía radio. Sus entornos de aplicación son principalmente campos abiertos y extensiones acuáticas. La representación geométrica de la propagación se ilustra en la figura 14.

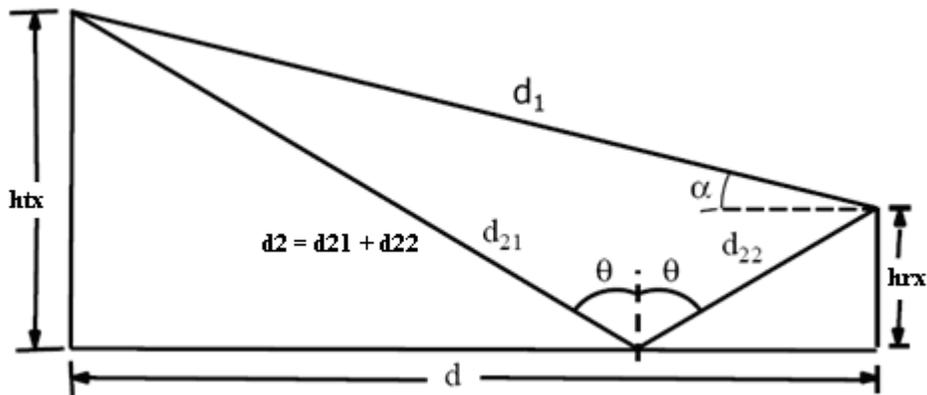


Figura 14. Geometría para el cálculo de pérdidas de propagación sobre tierra plana.

De donde se pueden deducir las siguientes ecuaciones de distancia y ángulo:

$$d_1 = \sqrt{(h_{Tx} - h_{Rx})^2 + d^2} \quad (94)$$

$$d_2 = \sqrt{(h_{Tx} + h_{Rx})^2 + d^2} \quad (95)$$

$$\alpha = \arctan \frac{h_{Tx} - h_{Rx}}{d} \quad (96)$$

Se identifican claramente dos tipos de rayos: el rayo directo entre el transmisor y el receptor y el rayo que se refleja en la superficie de la tierra y se dirige al receptor. Para el caso del rayo directo las pérdidas de propagación se calculan con la fórmula de pérdidas de espacio libre. De esta forma la potencia recibida será:

$$P_{R1} = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 g_{Tx} g_{Rx} \quad (97)$$

Donde P_t es la potencia de transmisión, λ la longitud de onda, y g_{Tx} y g_{Rx} son las ganancias de las antenas transmisora y receptora respectivamente en veces respecto al radiador isotrópico.

Las pérdidas del rayo reflejado se calculan con las leyes de reflexión de las ondas planas. El factor de reflexión para una onda incidente desde el vacío hacia una superficie con propiedades electromagnéticas E_{eff} , está dado por:

$$R(\theta, E_{eff}) = \frac{\cos\theta - \sqrt{E_{eff} - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{E_{eff} - \sin^2\theta}} \quad (98)$$

Entonces la potencia de la onda reflejada hacia el receptor será:

$$P_{R2} = P_t R(\theta, E_{eff}) \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2 g_{Tx} g_{Rx} \quad (99)$$

Finalmente la potencia total recibida es la suma de la potencia de cada uno de los rayos considerados, de la siguiente forma:

$$P_R = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 g_{Tx} g_{Rx} \left| \frac{1}{d_1} + R(\theta, E_{eff}) \frac{e^{j\Delta\phi}}{d_2} \right| \quad (100)$$

Donde $\Delta\Phi$ es la diferencia de fase entre las dos ondas y se representa por la ecuación 101.

$$\Delta\phi = 2\pi(d_2 - d_1) / \lambda \quad (101)$$

Aproximando este valor mediante las series de Taylor, debido a que $(d_2 - d_1)$ es muy pequeño en los casos generales, se tiene:

$$d_2 - d_1 = \frac{2h_{Tx}h_{Rx}}{d} \quad (102)$$

Partiendo de un supuesto para cálculos electromagnéticos que la superficie de la tierra es metálica y que el ángulo de incidencia θ es cercano a los 90 grados, el factor de reflexión $R(\theta, E_{eff})$ toma valores cercanos a -1 y la expresión para la potencia recibida se simplifica de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_0 &= P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 g_{Tx} g_{Rx} \cdot 2 \cdot (1 - \cos \Delta\phi) \\ P_0 &= P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 g_{Tx} g_{Rx} \cdot 4 \cdot \sin^2 \frac{2\pi h_{Tx} h_{Rx}}{\lambda d} \\ P_0 &= P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 g_{Tx} g_{Rx} \cdot 4 \cdot \sin^2(\Delta\phi / 2) \text{ para polarización horizontal} \end{aligned} \quad (103)$$

Para valores de $\Delta\Phi$ más pequeños que 0.6 radianes: $\sin \Delta\Phi \approx \Delta\Phi$, y la expresión se simplifica a la fórmula de la ley de la cuarta potencia:

$$P_0 = P_t g_{Tx} g_{Rx} \left(\frac{h_{Tx} h_{Rx}}{d^2} \right)^2 \quad (104)$$

Cabe notar que en esta última fórmula la dependencia de la frecuencia desaparece. De manera práctica se pueden identificar dos comportamientos del modelo de propagación por dos rayos: cerca del transmisor; donde la potencia de recepción disminuye con el cuadrado de la función seno según la ecuación 100. Y lejos del transmisor, cuando la diferencia de fase ($\Delta\Phi$) es más pequeña que 0.6 radianes, en cuyo caso se comporta según la ecuación 104. La distancia donde la diferencia de fase se hace menor a 0.6 radianes se puede calcular con la ecuación 105.

$$d_{Breakpoint} = d_{\Delta\phi < 0.6} = \frac{2\pi h_{Tx} h_{Rx}}{0.6\lambda} \quad (105)$$

La figura 15 ilustra los resultados de predicciones según las pérdidas de espacio libre, el modelo de dos rayos y la ley de cuarta potencia ($\Delta\Phi < 0.6$ rad y la potencia de recepción disminuye con el cuadrado de la distancia). Los parámetros usados son: antenas con ganancia unidad, $h_{Tx}=25$ m, $h_{Rx}=1.5$ m, $P_{Tx} = 0$ dBm y frecuencia = 2.4 Ghz. Se puede evidenciar claramente el cambio de comportamiento del modelo de dos rayos en función de la diferencia de fase:

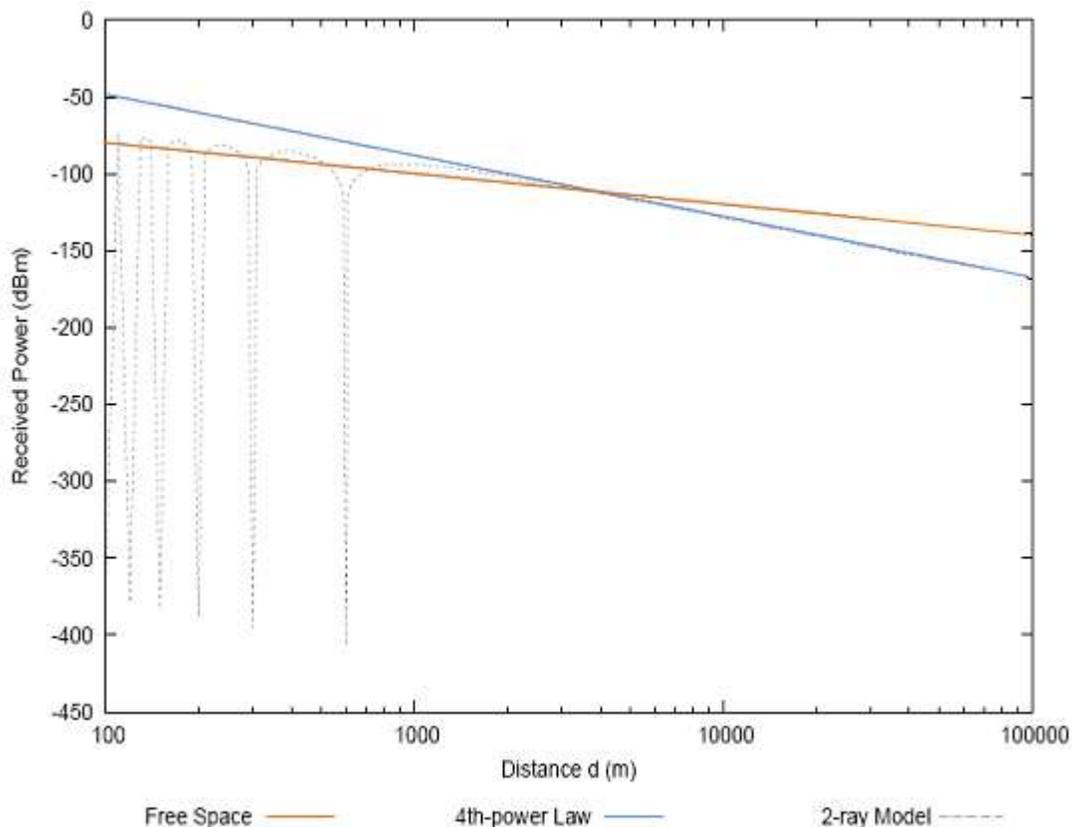


Figura 15. Potencia de recepción en función de la distancia.

2.3 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN

La selección del modelo de propagación es una decisión importante en el proceso de planeación y diseño de redes inalámbricas, puesto que este determinará las pérdidas de trayecto y por ende afectará todos los elementos del presupuesto del radio enlace. Además algunos modelos son más optimistas que otros y se adecuan mejor a condiciones de terreno particulares, por ello es importante determinar los modelos más adecuados para una topografía irregular y de tipo rural que arrojen valores de pérdidas con mayor precisión.

Con el propósito de hacer una depuración de los modelos aplicables a este caso de estudio, se realizará una evaluación del desempeño de los modelos nombrados en la sección anterior a partir de un ambiente de radio propagación conocido del cual se tienen medidas de intensidad de señal recibida.

2.3.1 Comparación de los resultados obtenidos haciendo uso de los modelos de propagación en un entorno rural para la banda de 2.4 Ghz: Para la banda de 2.4 Ghz se utilizará la información disponible de un radio enlace de prueba, entre Cajete y Puracé, implementado por el grupo GNTT (Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones) perteneciente a la Universidad el Cauca. Dicho radio enlace funciona en la banda de 2.4 Ghz con la tecnología FWA IEEE 802.11g. La distancia calculada entre la estación transmisora y receptora es de 25.18 km. La altura de la estación de transmisión y receptora es de 2.5 m. La potencia de transmisión se estima en 400 mW con ganancias de las antenas transmisora y receptora de 17 dBi. La polarización es vertical. Las coordenadas geográficas de la estación transmisora son: latitud: 2° 28' 2.90" N y longitud 76° 39' 15.06" O. Las coordenadas de la estación receptora son: latitud: 2° 22' 55.10" N y longitud 76° 26' 39.40" O.

Con el propósito de aplicar en este caso práctico los modelos de propagación que se han documentado en este capítulo, se tipifica el terreno de manera general como terreno montañoso con moderada densidad de árboles. El tipo de suelo se considerara como "tierra buena". El clima es de tipo templado continental. El radio efectivo de la tierra con refractividad atmosférica $K = 1.33$ será de 8451 Km. La constante dieléctrica relativa (ϵ) se asume con un valor por defecto de 15 pF/m y el factor de atenuación por la rugosidad de la superficie (g) con un valor de 1.

Para el desarrollo de este ejercicio se requiere de información de elevación del terreno, la cual se puede obtener de un modelo de elevación digital, para calcular

la altura media del terreno y las alturas efectivas. Debido a que no se cuenta con esta información de elevación se ha optado por utilizar los valores de alturas efectivas arrojados por la herramienta para el diseño de sistemas inalámbricos: SPLAT RF¹⁵, la cual utiliza información extraída de Modelos de Elevación Digital. El método utilizado por la herramienta para el cálculo de la altura media del terreno es el definido por la Comisión Federal de Comunicaciones (Parte 73.313(d)). De acuerdo a esta definición, la altura media se calcula muestreando y promediando la elevación del terreno a lo largo de ocho radiales entre 3 y 16 Kilómetros desde el sitio que está siendo analizado para los azimut cada 45 grados comenzando con el norte verdadero.

El perfil del terreno aparece en la figura 16.

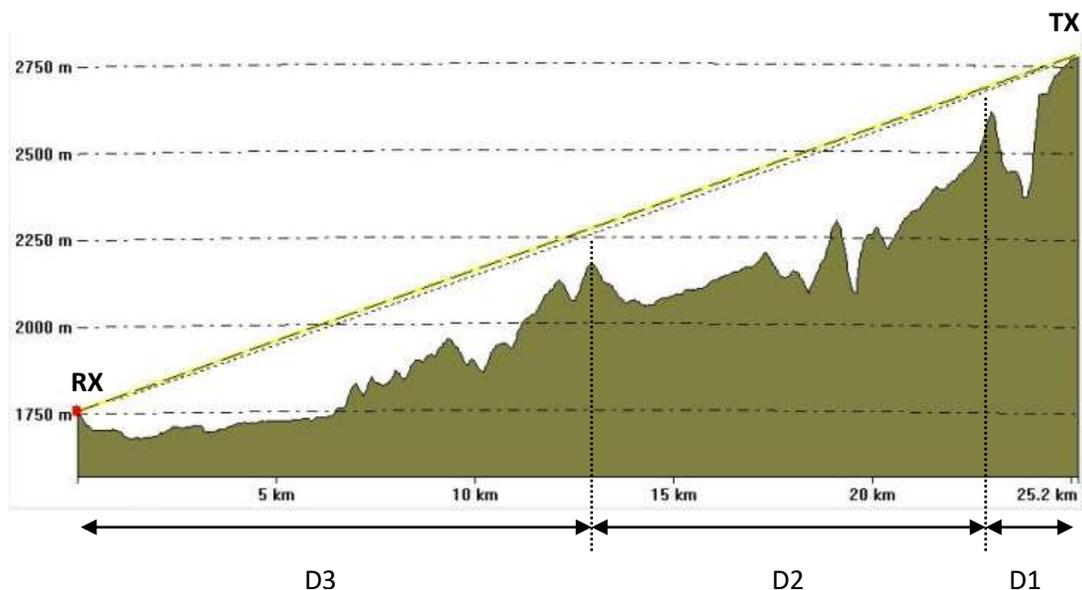


Figura 16. Perfil del trayecto de propagación

Donde:

- D= 25.18 Km
- D1= 2.18 Km
- D2= 10 Km
- D3= 13 Km

¹⁵ <http://www.qsl.net/kd2bd/splat>

- Altura en la base de la antena transmisora = 2782 msnm
- Altura en la base de la antena receptora = 1757 msnm
- Altura obstáculo 1 = 2620 msnm
- Altura obstáculo 2 = 2150 msnm
- Altura media del terreno en el transmisor = 2693.9 msnm
- Altura media del terreno en el receptor = 1718.7 msnm

Según el perfil del terreno, donde se muestra despejado el 60% de la primera zona de fresnel, las pérdidas por difracción para el método UIT-R 526 y el modelo de Epstein-Peterson serán de 0 dB. Para los otros modelos de propagación se obtienen manualmente los resultados de pérdidas de trayecto indicados en la tabla 18. Se utiliza el modelo de Longley Rice en el modo de área con una confiabilidad del 90, 50 y 10 %.

La figura 17 muestra un diagrama de barras que compara las pérdidas de trayecto obtenidas con los diferentes modelos de propagacion y las pérdidas obtenidas en la práctica (en color naranja).

Modelo de Propagación	Pérdidas de Trayecto (dB)
Espacio libre	128.07
Cost 231 Hata	28.71
ECC-33	126.67
Ericsson	125.61
Lee	127.47
SUI Tipo C	148.05
SUI Tipo B	165.78
SUI Tipo A	176.83
Longley Rice (confiabilidad 90)	187.9
Longley Rice (confiabilidad 50)	172
Longley Rice (confiabilidad 10)	155.4
2D Anderson	142.27
Pérdida de trayecto real	133

Tabla 18. Pérdidas de trayecto en la banda de 2.4 Ghz.

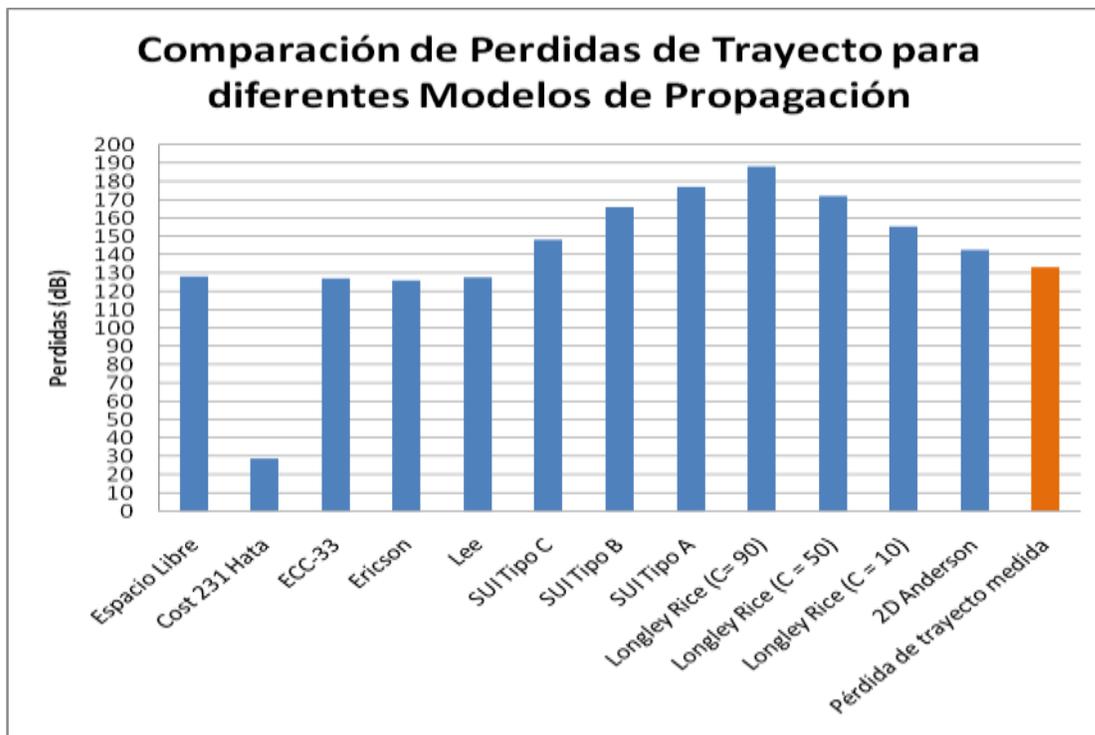


Figura 17. Comparación de pérdidas de trayecto para la banda de 2.4 Ghz.

Se observa para este sistema inalámbrico funcionando en un ambiente de propagación rural en la banda de 2.4 Ghz:

- El modelo de COST 231 Hata arroja unas pérdidas demasiado bajas en comparación a los demás modelos, debido a que en este caso la altura efectiva del receptor es de 40.08 m y excede por un gran valor la máxima altura de recepción (10 m) considerada por el modelo.
- Existe un grado de aproximación entre las pérdidas reales y los valores de pérdidas calculados según la mayoría de los modelos empíricos: Lee, Ericsson y ECC-33. Sin embargo no ocurre lo mismo con los modelos empíricos de SUI que en esta ocasión se encuentran muy por encima de las pérdidas reales, variando desde 15.05 dB hasta 43.83 dB, según el tipo de terreno (A, B ó C).
- Las pérdidas calculadas con el modelo de Longley Rice para las distintas confiabilidades tienen un valor muy elevado en comparación con las pérdidas reales, existiendo una diferencia de entre 22.4 dB y 54.9 dB para los dos extremos de confiabilidad respectivos (10% y 90%).

- El modelo 2D Anderson presenta una diferencia de 9.27 dB con el valor de pérdidas reales, siendo significativa pero no tan alta comparada con el modelo de Longley Rice y los modelos de SUI.

2.3.2 Análisis y selección de modelos de propagación: Después de haber documentado los principales modelos de propagación que tradicionalmente se han utilizado en el diseño de redes inalámbricas, y haber calculado sus predicciones para el caso de estudio en la banda de 2.4 GHz, se realizará la selección de los modelos que se considerarán son aplicables para el diseño de las redes FWA en entornos rurales.

Los modelos empíricos: Lee y Ericsson tienen un comportamiento similar en el caso de estudio analizado y además se aproximan notablemente a las pérdidas de trayecto reales, por lo cual se considera que pueden ser de gran utilidad y servir como referencia en el momento de diseñar un sistema FWA en entornos rurales.

Por otro lado el modelo de SUI, diseñado para sistemas FWA, presenta resultados interesantes y valiosos siempre y cuando se escoja el tipo de terreno más indicado para el proceso de cálculo de las pérdidas, ya que las variaciones entre ellos son considerables. Por ello este es el principal inconveniente de este modelo.

El modelo 2D Anderson ha demostrado ser preciso para el ejercicio anterior, sin embargo se requiere tener información detallada sobre el perfil del trayecto para calcular acertadamente las pérdidas de reflexión y definir con claridad si existe ó no obstrucción parcial de la zona de Fresnel.

El modelo de COST 231 es altamente dependiente del cumplimiento de sus rangos de frecuencia y altura de receptor recomendados, siendo más crítico para este último rango, por lo cual su aplicación se debe realizar con el cuidado necesario para que las pérdidas arrojadas sean coherentes.

Las pérdidas de trayecto para el modelo de Longley Rice pueden diferir de las pérdidas reales, dependiendo del procedimiento utilizado para el cálculo: modo área ó modo punto-punto, por ejemplo en el caso donde no se tiene suficiente información sobre el terreno y se hace necesario utilizar el modo de área, muchos de los parámetros de entrada del modelo se calculan con algoritmos predefinidos, y en ocasiones estos parámetros calculados difieren bastante de sus valores reales, causando imprecisiones en el resultado final, por lo tanto, se debe tener precaución en la aplicación de cada uno de estos modos.

Según esto, la selección del modelo de propagación es altamente dependiente de la situación particular de cada sistema FWA que se desee implementar. Se deben considerar varios parámetros como:

- El entorno geográfico para el cual aplica el modelo (montañoso, boscoso, plano, etc) que por lo general están dados en términos cualitativos y depende del criterio del diseñador la determinación del más apropiado al entorno de trabajo.
- Los rangos de variables de entrada (frecuencias, distancias, alturas, etc) recomendados por el modelo, los cuales al sobrepasarse afectan, dependiendo del modelo, en una mayor proporción la predicción de las pérdidas de trayecto.
- La información detallada que se tenga sobre el perfil del trayecto, puesto que es indispensable en la precisión de algunos modelos, especialmente los modelos determinísticos.
- También es necesario considerar que algunos modelos requieren datos especiales del ambiente de propagación, los cuales no siempre están disponibles.

En el marco de este trabajo de grado y pensando en desarrollar un “Herramienta Software de Planeación Radio para Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo en Ambientes Rurales” que cuente con diferentes posibilidades para el cálculo de las pérdidas de trayecto en función de las situaciones, entornos de propagación y disponibilidad de la información, de tal forma que sea versátil en sus alternativas de aplicación, y con preferencia por las situaciones de línea de vista, se ha decidido escoger los siguientes modelos de propagación a implementar: Espacio libre (Friss), Lee, ECC-33, Ericsson, SUI, 2D Anderson (para casos de línea de vista) y Longley Rice (para sistemas dentro de la región de visibilidad).

3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

3.1 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) (GIS, *Geographic Information System*) es una herramienta que cuenta con la capacidad de realizar representaciones del mundo real, haciendo uso de bases de datos de información geográfica. Los SIG tienen gran importancia en la vida diaria porque son una herramienta que sirven de soporte para la toma de decisiones en los pequeños y grandes proyectos productivos y públicos.

En los años sesenta se desarrolló en Canadá el primer SIG llamado Sistema de Información Geográfica Canadiense (CGIS, *Canadian Geographic Information System*) [23]. De manera simultánea se desarrollaron otros SIG en Estados Unidos, como por ejemplo: el Sistema de Información de Recursos y Uso del Terreno (LUNR, *Land Use and Resource Information System*), Sistema de Información de Gestión del Terreno de Minnesota (MLMIS, *Minnesota Land Management Information System*) y el Sistema de Información de Superposición Poligonal (PIOS, *Polygon Information Overlay System*) [23].

Estados Unidos es el país que más ha aportado en investigación y desarrollo de sistemas SIG.

A finales del año 1970 se expandió rápidamente el uso de computadores en el manejo de información cartográfica y se mejoraron muchos sistemas SIG para la utilización de diferentes aplicaciones cartográficas.

En la década de los 80 se hizo una gran difusión en el mundo informático sobre las funcionalidades de los SIG, lo que permitió que existiera una etapa comercial, en donde las empresas y compañías privadas se manifestaron muy interesadas, ya que la aplicación comercial de los SIG era identificar donde se encontraban los mercados potenciales y esto es vital para cualquier negocio. En esa época la

tecnología de cómputo seguía evolucionando y contaba con una gran aceptación, lo que favoreció a los SIG en su proceso de expansión.

A inicios de este siglo ha surgido un nuevo periodo en la explotación de los SIG, debido a que se tienen computadores con mejores prestaciones para el soporte de estos sistemas, además de la inclusión del Internet como medio mundial de obtención de información cartográfica.

Hoy en día existen muchos software SIG en el mercado con potentes funcionalidades, incluyéndose entre ellos algunos propietarios y otros de uso libre, tales como: Ilwis, Arcview, gvSIG, uDIG, entre otros. Estos sistemas SIG son muy utilizados en el ámbito empresarial, debido a que sus aplicaciones están dirigidas a los cargos gerenciales. Entre algunas aplicaciones de los SIG se tiene la supervisión de la provisión de productos en una red de distribución y el apoyo en la toma de decisiones sobre la ubicación de un nuevo canal de distribución, ya que el SIG proporciona información sobre el mercado potencial y la ubicación de los competidores, en 3.1.5 se realiza una mayor descripción de las aplicaciones de los SIG.

Un SIG debe estar en la capacidad de realizar y responder consultas de ubicación: lo que existe en un determinado lugar (¿Qué hay en tal localización?), condición: identifica las ubicaciones que cumplen con ciertas condiciones (¿Dónde sucede que...?), tendencias: comparación entre situaciones temporales ó espaciales distintas de alguna característica (¿Qué ha cambiado...?), rutas: cálculo de rutas óptimas entre dos ó más puntos (¿Cuál es el camino óptimo...?), pautas: detección de pautas espaciales (¿Qué pautas existen...?) y modelos: generación de modelos a partir de fenómenos ó actuaciones simuladas (¿Qué ocurriría si...?).

3.1.1 Definición de SIG: Un SIG se define como un sistema formado por componentes informáticos (hardware y software) y procedimientos elaborados para permitir la captura, gestión, análisis, manipulación, modelado, y presentación de información geográfica y sus atributos, con la finalidad de satisfacer problemas de planificación y gestión [24].

Una definición más sencilla de SIG es la de un sistema informático con capacidad para gestionar datos referenciados por coordenadas espaciales ó geográficas y que cuenta con un conjunto de operaciones para realizar análisis y brindar apoyo en la toma de decisiones en la solución de problemas.

Son muchas las definiciones que se pueden encontrar acerca de los sistemas de información geográfica, algunas enfatizan en sus funcionalidades, otras en sus bases de datos, otras en su capacidad de dar respuesta a preguntas y aportar en la toma de decisiones, pero todas las definiciones describen al SIG como un sistema integrado para el análisis de información espacial como guía en el momento de resolver problemas.

3.1.2 Funcionamiento: Un SIG puede manejar dos formatos de almacenamiento de la información: Raster y Vector. El formato Raster se orienta a identificar propiedades del espacio, haciendo una división en celdas regulares en donde cada una de ellas tiene un valor único. Entre más grande sea el tamaño de la celda, la resolución disminuye y por lo tanto habrá menor precisión en la representación del espacio geográfico. Hay varios tipos de formato Raster, presentando especial importancia en la resolución de problemas que requieran datos de altura del terreno el Modelo de Elevación Digital (DEM, *Digital Elevation Model*). Un DEM consiste en una serie de puntos con coordenadas conocidas referenciadas a un sistema de coordenadas bidimensionales a las que se les asocia un valor de elevación; generalmente esta representación es una forma simplificada de la geometría de la superficie del terreno. Un formato de DEM es el de Red Irregular Triangulada (TIN, *Triangulated Irregular Network*), que significa que en la producción del DEM se empleó el método de TIN para hacer la compresión de la información topográfica. El empleo de este formato trae consigo la ventaja de que los puntos sobre la topografía del terreno están referidos a las características del terreno que son irregulares, los cuales en la cartografía tradicional no siempre están presentes de una manera precisa, razón por la cual es uno de los formatos recomendados por Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para el almacenamiento de datos topográficos.

Por otro lado, el formato Vector representa la información por medio de pares de coordenadas (x,y), se utiliza cuando se requiere precisión en la ubicación de los objetos sobre el espacio y los fenómenos a representar son discretos. Para el modelado de los entes reales se emplean tres objetos espaciales: el punto, la línea y el polígono. Para generar un punto se necesita un par de coordenadas, con dos puntos se genera una línea y con una agrupación de líneas se forma un polígono.

El formato vector es el más utilizado actualmente en el mundo, sin embargo, el formato Raster sigue teniendo importancia en algunos sectores donde se analizan fenómenos no discretos que no requieren gran precisión en la ubicación geográfica.

En la figura 18 se observan algunas diferencias de visualización entre los dos formatos de almacenamiento de información, para representar un sistema del mundo real.

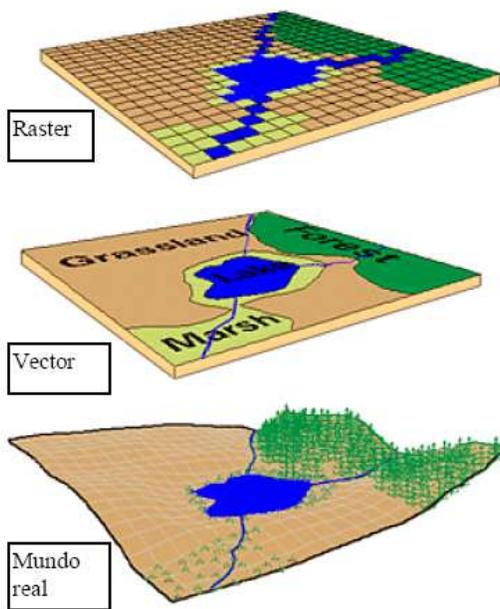


Figura 18. Modelo Raster y Vector [25]

Un SIG almacena información sobre el mundo en una base de datos geográfica, que combina datos geométricos (localización y forma) y temáticos (información descriptiva), por ejemplo, la figura 18 contiene un lago dibujado con forma geométrica, pero además puede tener asociados otros datos como flora, fauna, pesca y niveles de contaminación. Cada tema de información está representado por una capa ó conjunto de objetos elementales de la misma naturaleza. Una capa contiene objetos espaciales y tiene asociada a ella una tabla de información estadística.

Un SIG permite analizar diferentes capas al mismo tiempo, de tal forma que se pueda relacionar simultáneamente una ó más variables con un sector específico de una región y analizar las situaciones desde distintos puntos de vista. La figura 19 muestra un modelo de capas para el formato raster y vector:

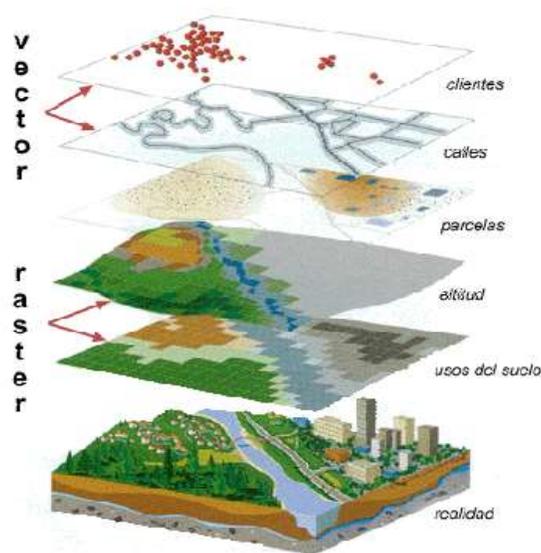


Figura 19. Superposición de capas [26]

3.1.3 Componentes de un SIG: Un SIG no sólo trata de un programa informático sino que está constituido por 5 componentes básicos fundamentales que hacen posible su funcionamiento. Los componentes son: equipos, programas, datos, recurso humano y métodos [24].

- **Equipos (hardware):** Es el hardware donde se ejecuta el sistema de información geográfica. Actualmente existen equipos de muy buenas características para que operen los SIG, tales como, servidores (computador central), computadores de escritorio ó computadores portátiles configurados en red ó individualmente, entre otros. Su función es permitir la entrada y salida de información geográfica en diversos medios y formas.
- **Programas (software):** El software SIG contienen funciones y herramientas para el almacenamiento, análisis y visualización de la información geográfica. Los programas cuentan con herramientas que permiten la entrada, manipulación, consulta, análisis y despliegue de datos. Un SIG también cuenta con un sistema para la administración de las bases de datos y una interfaz gráfica de usuario para acceder a las herramientas de este sistema.

Hoy en día los proveedores de programas SIG distribuyen productos de fácil manejo y que utilizan muchos formatos. Además existen varias organizaciones públicas y privadas que se encargan de la distribución de software SIG libre y privado.

- **Datos:** La información constituye el componente más importante de un sistema de información geográfica. La adquisición de los datos puede ser realizada por la organización que implementa el SIG ó bien proceder de proveedores comerciales de datos SIG.

Para que el SIG obtenga buenos resultados se debe contar con datos de soporte de excelente calidad. Es necesario tener en cuenta que entre el 60% y 80% del presupuesto de implementación del SIG es destinado para adquirir datos con calidad.

- **Recurso humano:** Además de contar con equipos y programas para la utilización del SIG, es necesario contar con personal que tenga conocimiento en SIG, utilice todas las herramientas, desarrolle y administre el sistema. De igual forma el personal debe mantener los datos actualizados y estar en la capacidad de plantear proyectos que resuelvan problemas del mundo real.
- **Métodos:** El éxito en la implementación de los sistemas de información geográfica dependen en gran parte de contar con un plan bien estructurado y unas reglas de actividades bien definidas, que son los modelos y prácticas operativas únicas de cada organización.

3.1.4 Base de datos geográfica: Los SIG manejan información geográfica que está constituida por dos componentes: la espacial y la temática de los datos; este es el elemento diferenciador frente a otro tipo de sistemas de información que solo manejan datos alfanuméricos, los cuales describen las características de los objetos geográficos (nombres, direcciones, identificación de la red, características de los contratos, etc.).

Una base de datos geográfica es una colección de datos que hace referencia a objetos con localización sobre la superficie de la tierra y que de manera organizada puede ser utilizada por una ó varias aplicaciones. Esta base de datos comprende la asociación de sus dos componentes: datos espaciales y atributos ó información descriptiva (datos alfanuméricos).

La función de la base de datos es almacenar y recuperar la información de manera selectiva, confiable y eficiente. La base de datos geográfica guarda los atributos alfanuméricos en tablas y los maneja por medio de un sistema administrador de base de datos. Los atributos gráficos que son la representación de los objetos geográficos son guardados en archivos y manejados por el software del sistema SIG. La estructuración de la información en la base de datos geográfica se realiza

por medio de capas, también llamadas niveles, esto hace que se tenga un mayor nivel de complejidad. En las capas los elementos son guardados por lo que ellos representan y no por la forma geométrica que tengan, por ejemplo: aunque la forma geométrica de los ríos y de las carreteras sea una línea, no están almacenados en la misma capa porque sus atributos son diferentes.

3.1.5 ¿Qué puede hacer un SIG por el usuario?: Los SIG pueden ser usados como herramienta de ayuda a la gestión y toma de decisiones en la mayoría de los sectores, contando con una amplia gama de aplicaciones entre las cuales se tienen [27]:

- **Cartografía automatizada:** Los organismos públicos se han encargado de la construcción y mantenimiento de planos digitales de cartografía, estos planos son dados a empresas que los necesitan, con la condición de que proporcionen más adelante versiones actualizadas de forma periódica.
- **Infraestructuras:** Son muchas las empresas que utilizan los SIG para el inventario, mantenimiento y gestión de empresas prestadoras de servicios (agua, gas, energía, telecomunicaciones, etc.). En estas empresas los sistemas SIG almacenan información alfanumérica que se encuentra ligada a sus representaciones gráficas, con la cual realizan consultas y análisis de las redes.
- **Gestión territorial:** En este sector se utilizan aplicaciones SIG para la administración de entidades territoriales. Estas aplicaciones se caracterizan por tener un acceso rápido a la información alfanumérica y gráfica, contando con herramientas para el análisis espacial de la información. Los SIG ayudan al mantenimiento de infraestructura y permiten generar documentos con información alfanumérica y gráfica que sirve de apoyo en la toma de decisiones en ordenamiento territorial.
- **Medio ambiente:** Las instituciones que trabajan con el medio ambiente utilizan los sistemas SIG para evaluar el impacto ambiental en la ejecución de los proyectos. Estas aplicaciones fundamentalmente ayudan en trabajos de explotación forestal, estudios de fragmentación, estudios de especies, caracterización de ecosistemas, planificación de explotaciones agrícolas, concentración de contaminantes, etc.
- **Recursos mineros:** En este campo los SIG ayudan al manejo de la información obtenida en la explotación de un banco minero. Existen

funciones para realizar análisis de sondeos ó puntos topográficos, perfiles, áreas de explotación ó capas geológicas.

- **Equipamiento social:** Las aplicaciones SIG facilitan la gestión de servicios de impacto social, entre los que se tienen: hospitales, servicios sanitarios, centros deportivos, culturales, lugares de concentración en casos de emergencias, centros de recreo, centros educativos, etc. Además de suministrar información sobre las sedes existentes, los SIG también permiten realizar una búsqueda de lugares adecuados para crear nuevos centros.
- **Ingeniería de tránsito:** En este sector el SIG se emplea para modelar la conducta del tráfico determinando patrones de circulación en las vías de comunicación.
- **Demografía:** En este campo las aplicaciones utilizan características demográficas para realiza un análisis demográfico con la finalidad de implementar negocios y servicios públicos.
- **GeoMarketing:** Es importante tener la base de datos de los clientes potenciales relacionados con el producto ó servicio que se le distribuye, para el diseño de una adecuada campaña de marketing ó el envío de correo promocional. El SIG también ayuda en ubicaciones futuras, análisis de mercados, ubicación de la competencia y ubicación de sucursales.
- **Banca:** En este campo son muy utilizados los SIG para la localización de los clientes, planificación de campañas informativas, publicidad, planificación de apertura de nuevas sucursales y el estudio de la competencia.
- **Planimetría:** La planimetría representa el terreno de forma bidimensional y le facilita al usuario la información del terreno para visualizar de forma clara y con gran exactitud la información que se encuentra ó requiere para su proyecto. Por ejemplo, permite averiguar la cantidad de postes telefónicos necesarios para ampliar su red, ó qué cantidad de cable necesita para llegar hasta un usuario.
- **Cartografía Digital 3D:** Las empresas de comunicaciones cuentan con herramientas e información tridimensional para la planeación de cobertura de las ondas de radio, optimización de las redes, ubicación de antenas, tendido de líneas de transmisión en 3D y análisis interferencia de radio frecuencia.
- **Protección Civil (riesgo, desastres y catástrofes):** Los SIG son de gran ayuda para la toma de decisiones ante catástrofes, ellos aportan información valiosa para minimizar diferentes tipos de riesgo, tales como amenazas

volcánicas, inundaciones, sismos, avalanchas, depósito de materiales peligrosos, entre otros.

3.2 ARCGIS DESKTOP

ArcGIS es un entorno de desarrollo (*framework*) propietario del Instituto de Investigación en Sistemas Ambientales (ESRI, *Environmental Systems Research Institute*) sobre el cual se pueden desarrollar Sistemas de Información Geográficos de todo tipo: para escritorio (*ArcGIS Desktop*), para uso en red (*ArcGIS Server*, *ArcIMS*) y para el despliegue en campo (*ArcGIS Mobile*). ARCGIS Desktop particularmente integra un conjunto de aplicaciones entre las que se encuentran ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox. Con estas aplicaciones e interfaces se puede prácticamente desarrollar cualquier tarea SIG, incluyendo: mapeo, análisis geográfico, edición y compilación de datos, gestión de datos, visualización y geoprocesamiento.

3.2.1 ArcView, ArcEditor y ArcInfo: ArcGIS Desktop como conjunto de herramientas posee la cualidad de ser escalable, adaptándose a las necesidades de cada usuario, por ello posee tres tipos de productos software con distintas licencias: ArcView, ArcEditor y ArcInfo.

ArcView es el conjunto de herramientas básico que agrupa mapeo completo y herramientas de análisis con funciones de edición y geoprocesamiento. Por otro lado ArcEditor incorpora capacidades de edición avanzadas para *Shapefiles*¹⁶ y bases de datos espaciales (*geodatabases*), además de las funcionalidades conocidas de ArcView. Finalmente ArcInfo es el paquete más especializado de ArcGIS Desktop, el cual fue construido a partir de ArcEditor, agregándole funciones avanzadas de geoprocesamiento.

Estos tres tipos de productos se desarrollan sobre la misma arquitectura y sus diferencias consisten en el grado de especialización de sus funciones, permitiendo al usuario escoger el producto que más se adapte a sus necesidades. Por otro lado una arquitectura común permite el intercambio de mapas, datos, simbología, capas (*layers*), herramientas e interfaces personalizadas, reportes y metadatos, aprovechando los beneficios de una única arquitectura.

Además nuevas funcionalidades pueden ser agregadas por medio de las extensiones ArcGIS Desktop de ESRI ó de otras organizaciones. Los usuarios

¹⁶ Shapefile: Es un formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos. Fue desarrollado por ESRI y se ha convertido en un formato estándar de facto.

también pueden desarrollar sus propias extensiones para ArcGIS Desktop trabajando con la librería de componentes de software ESRI denominada ArcObjects. El desarrollo de extensiones y herramientas personalizadas por parte del usuario se lleva a cabo utilizando las Interfaces de Programación de Aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) estándares de Windows, tales como el Modelo de objetos de Componentes (COM, *Component Object Model*) y .NET.

ArcObjects es una estructura que permite crear componentes software a partir de otros componentes, existiendo colaboración entre estos para la consecución de funciones de presentación de mapas y gestión de datos, comunes en las aplicaciones SIG. ArcObjects provee una infraestructura para la personalización de aplicaciones que permite cumplir con las necesidades específicas de cada cliente.

3.2.2 ArcMap: ArcMap es la aplicación central de ArcGIS Desktop. Es utilizada para todas las tareas basadas en mapas, que incluyen cartografía, análisis de mapas y edición. Los mapas tienen una vista de diseño que contiene una ventana geográfica ó una ventana de datos, con capas, leyendas, barra de escalas, flecha de norte y otros elementos, tal como se ilustra en la figura 20.

3.2.3 ArcCatalog: Esta aplicación se utiliza para organizar y gestionar toda la información SIG como mapas, globos, conjuntos de datos (*datasets*), modelos, metadatos, servicios, etc. Cuenta con herramientas para:

- Buscar y encontrar información geográfica.
- Grabar, ver y gestionar metadatos.
- Definir esquemas y diseños de bases de datos geoespaciales (geodatabases).
- Administrar un servidor ArcGIS.
- Buscar y descubrir datos SIG en redes locales y en la Web.

Un usuario SIG emplea ArcCatalog para organizar, encontrar y usar datos SIG, y para documentar sus bases de datos usando metadatos estandarizados. Un administrador de bases de datos SIG lo utiliza para definir y construir bases de datos. Un administrador de un servidor SIG lo emplea para administrar el servidor. La interfaz gráfica de la aplicación se muestra en la figura 21.

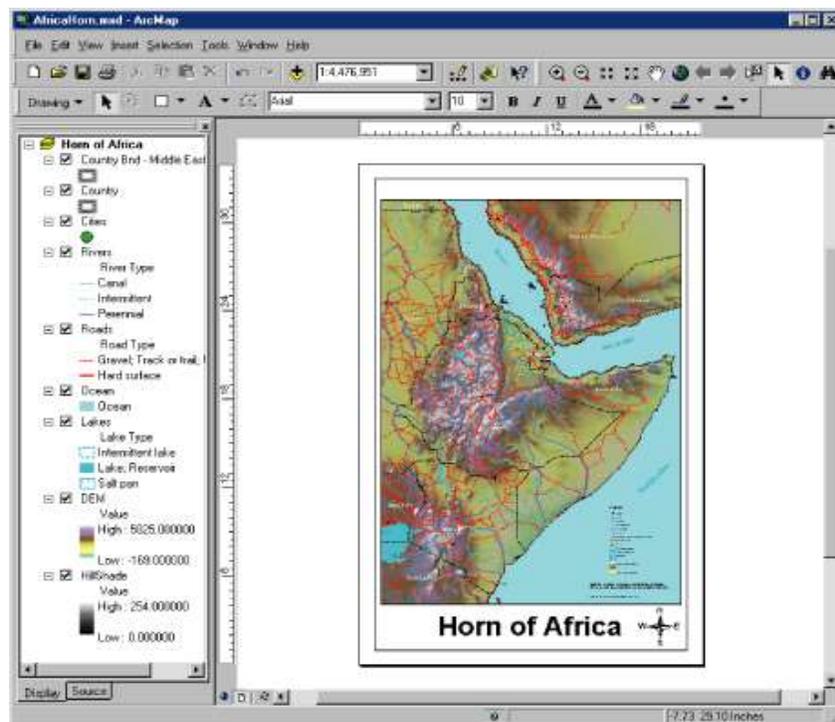


Figura 20. Interfaz gráfica de ArcMap.

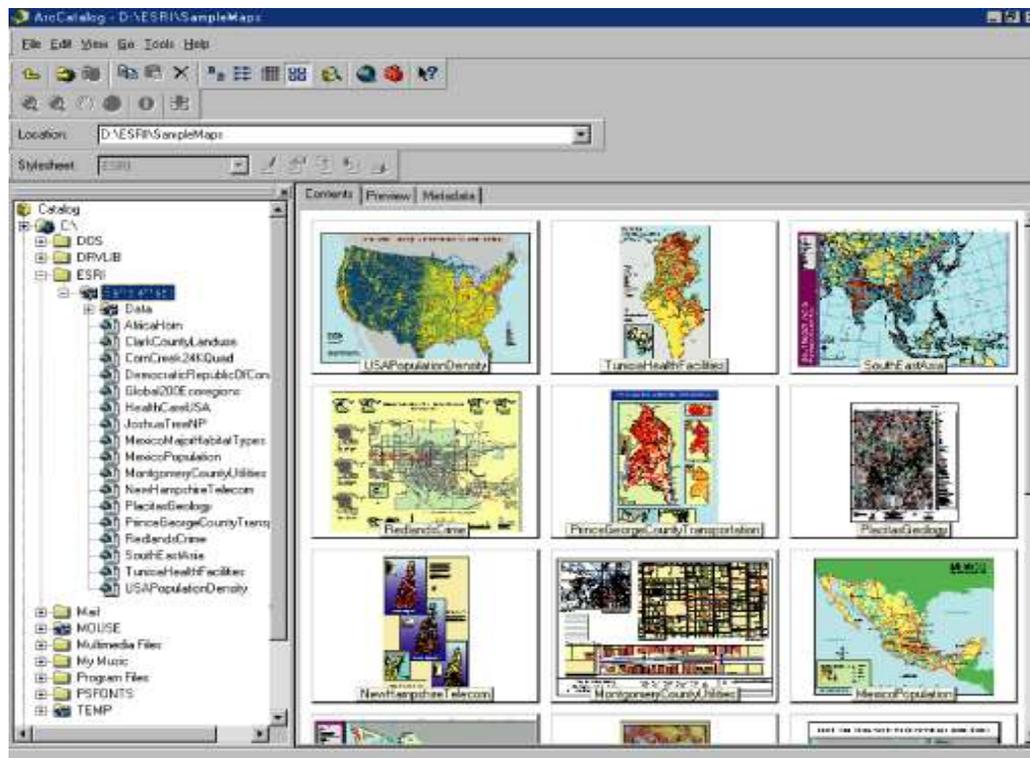


Figura 21. Interfaz gráfica de ArcCatalog.

3.3 PERSONALIZACIÓN DE APLICACIONES ARCGIS DESKTOP

Una de las características más importantes de las aplicaciones ArcGIS Desktop es la posibilidad de que el usuario interactúe con estas para individualizarlas, haciendo que se adapten a sus gustos, preferencias, ó necesidades. Ejemplos de personalización son:

- Crear y posicionar las barras de herramientas y menús en un área específica de la aplicación.
- Agrupar comandos en sectores.
- Agregar nuevos macros ó cargar comandos personalizados.
- Crear funciones adicionales enlazando código a menús ó herramientas.
- Trabajar con los mismos datos geográficos, mediante plantillas.

Estas opciones de personalización se realizan con la ayuda de la caja de dialogo de personalización (figura 22) que permite crear barras de herramientas y agregar ó remover controles.



Figura 22. Caja de dialogo para personalización.

3.3.1 Desarrollo de Macros VBA en Aplicaciones ArcGIS: Las aplicaciones ArcMap y ArcCatalog incorporan el componente Visual Basic para Aplicaciones (VBA, *Visual Basic® for Applications*). VBA es un programa incluido en las aplicaciones que contiene un ambiente de programación integrado llamado Editor de Visual Basic (VBE, *Visual Basic Editor*), en el cual se pueden escribir macros de Visual Basic, para posteriormente probarlos y ejecutarlos en ArcMap y ArcCatalog. Un macro puede integrar algunas ó todas las funcionalidades de Visual Basic con la extensa librería de objetos de ArcMap y ArcCatalog y disponer de las librerías de objetos de ESRI.

Con VBA se pueden crear comandos personalizados, como botones, herramientas ó cajas de edición, denominados UIControls, e incorporar código al control de eventos de tal forma que se ejecute alguna acción determinada cuando se seleccione dicho comando. Estos comandos se dibujan en una barra de herramientas de la aplicación.

La interfaz VBE para la implementación de macros se presenta en la figura 23.

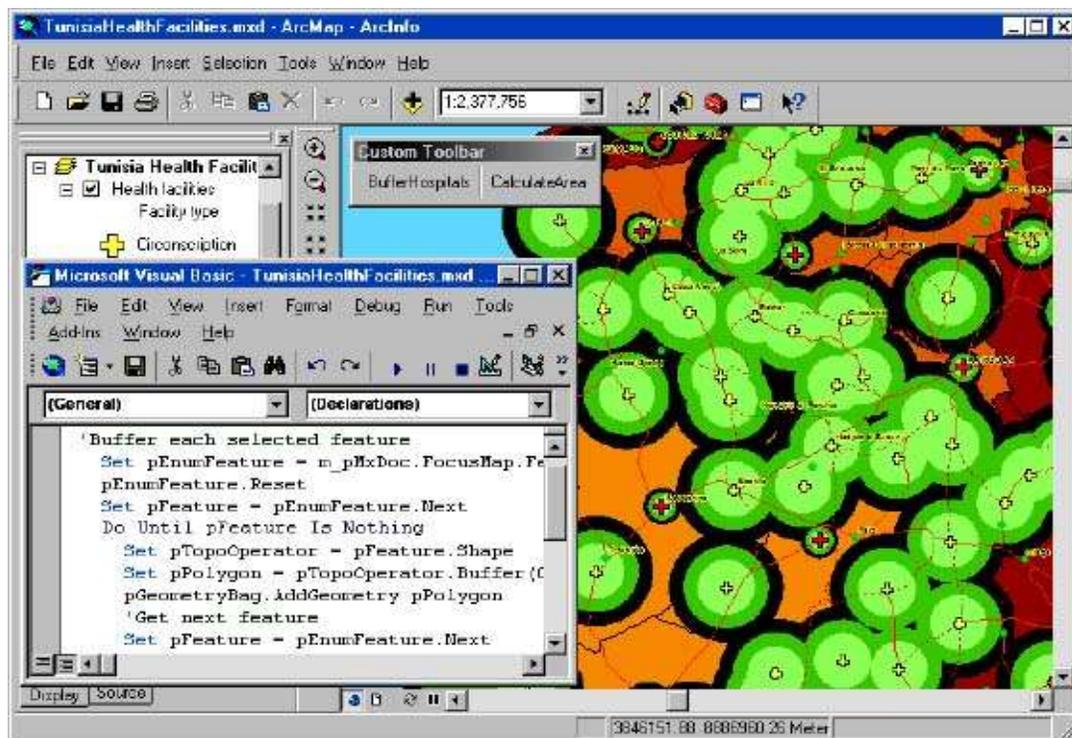


Figura 23. Interfaz Visual Basic Editor (VBE).

VBA es un lenguaje de programación sencillo con algunas funcionalidades adicionales como codificación en tiempo de diseño y Buscador de Objetos (*Object Browser*) que ayudan a una rápida codificación.

Entre las ventajas de utilizar el entorno VBA se encuentran:

- La creación y prueba de macros dentro de las aplicaciones ArcMap y ArcCatalog se realiza de manera fácil y rápida.
- Las librerías ESRI se encuentran disponibles como referencia para el programador.
- Existen variables globales importantes, como las referentes a la aplicación y al documento (Application and Document).
- Se permite la incorporación de formularios de interfaz de usuario usando componentes VBA y ActiveX®
- Es posible la integración de código VBA con nuevos UIControls ArcObjects.
- Se puede migrar desde código VBA hacia proyectos de Librerías de Enlace Dinámico (DLL, *Dynamic Linking Library*) ActiveX.
- Existen ejemplos de código disponibles en el sistema de ayuda.

3.3.2 Desarrollo de Componentes en aplicaciones ArcGIS Desktop: En algunos casos especiales de personalización de comandos y barras de herramientas más avanzados (componentes) se hace necesario utilizar un entorno de desarrollo diferente a VBA. Las personalizaciones desarrolladas por fuera de VBA se distribuyen como DLLs ActiveX. Estos proyectos DLL se pueden agregar a ArcMAP y ArcCatalog y utilizarlos normalmente como cualquier otro comando.

El desarrollo de componentes implica la creación de un proyecto en el entorno de desarrollo seleccionado, referenciación a las librerías de tipo ArcObjects que se requieran, implementación de interfaces ArcObjects, adición de código, y compilación del código fuente para obtener el archivo binario. Los componentes pueden ser clasificados dentro de dos áreas bien definidas de personalización: las que residen en el nivel de aplicación como: botones, barras de herramientas, ventanas y extensiones, y aquellas que residen a nivel de bases de datos espaciales como: personalización de clases y de propiedades.

ArcGIS Desktop soporta las siguientes APIs: COM (con cualquier lenguaje para COM, por ejemplo: Visual Basic, Visual C++) y .NET (con lenguajes como Visual Basic .NET y C#). En el desarrollo de estos componentes los programadores tienen la opción de utilizar las funcionalidades ofrecidas por ArcObjects ó extender dichas funcionalidades con sus propios componentes, en todo caso existen procedimientos únicos dependiendo de la API seleccionada para el desarrollo.

3.4 ARCOBJETS

ArcObjects es un conjunto de componentes software independientes que proveen servicios para soportar las aplicaciones GIS de escritorio para clientes pequeños y grandes. ArcObjects fue desarrollado utilizando el lenguaje de programación C++, y utilizando el modelo COM.

El modelo COM agrupa un conjunto de especificaciones acerca de cómo los objetos se implementan, se construyen en memoria y como se comunican con otros objetos. De esta forma COM provee una infraestructura sólida a nivel de sistemas operativos para soportar cualquier otro sistema que se haya construido utilizando el modelo COM, como es el caso de los sistemas operativos de Microsoft Windows donde la infraestructura COM esta construida directamente sobre el sistema operativo y por ello es completamente compatible con las aplicaciones construidas con ArcObjects. En el caso de sistemas operativos diferentes a los de Microsoft Windows, la infraestructura COM debe ser provista por el sistema ArcObjects para funcionar.

En la figura 24 se muestran las categorías de componentes utilizadas para el desarrollo de ArcGIS Desktop, donde se destacan cuatro categorías que albergan la mayoría de las funcionalidades para desarrolladores y usuarios de ArcGIS: servicios básicos, acceso a datos, análisis de mapas y presentación de mapas.

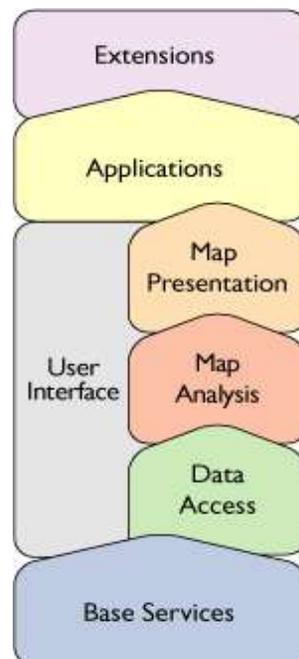


Figura 24. Estructura modular de ArcGIS Desktop

El conocimiento de las librerías de ArcGIS Desktop, sus funciones y dependencias entre ellas, es indispensable para realizar un trabajo de desarrollo y para navegar eficientemente por los componentes de la aplicación. Las librerías de mayor importancia que conforman ArcGIS Desktop, con sus respectivas relaciones de dependencia, se ilustran en la figura 25.

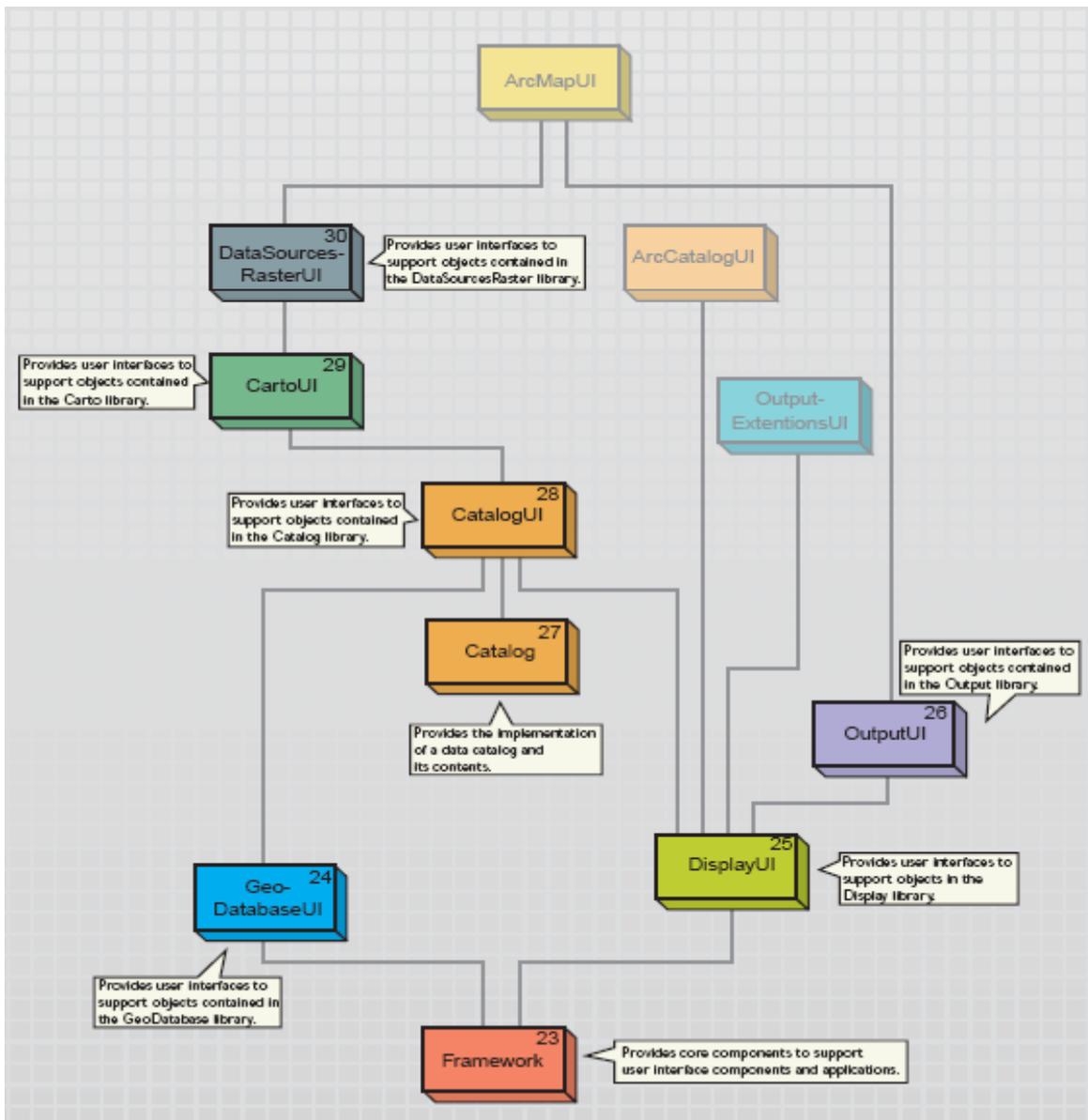


Figura 25. Librerías de la aplicación ArcGIS Desktop

Resumiendo las funcionalidades de cada librería se tiene:

- **Framework:** Esta librería contiene los componentes de núcleo y las interfaces software necesarias para el soporte de la aplicación ArcGIS y los componentes de la interfaz de usuario. Algunos de los objetos contenidos en esta librería son utilizados por la aplicación para brindar opciones de personalización al desarrollador, por ejemplo, cuando crea interfaces personalizadas de usuario.
- **GeoDatabaseUI:** Esta librería contiene interfaces de usuario para acceder a los objetos de la librería *GeoDatabase*. Por lo tanto agrupa cajas de dialogo, vista de tablas, calculadora, entre otras interfaces.
- **DisplayUI:** Esta librería contiene interfaces de usuario para acceder a los objetos de la librería *Display*. Todos los símbolos de la librería *Display* tienen sus propiedades definidas en esta librería y por ello esta librería dispone de cajas de dialogo para la gestión de los estilos y símbolos.
- **OutputUI:** Esta librería contiene interfaces de usuario para acceder a los objetos de la librería *Output*. Entre las interfaces se encuentran las páginas de propiedades y las cajas de dialogo disponibles para uso del desarrollador.
- **Catalog:** Esta librería contiene objetos y define interfaces para soportar catálogos de datos. Un catalogo es una representación de un dato persistente, que puede encontrarse localmente ó de manera remota. Con los objetos de *Catalog* el desarrollador puede buscar fuentes de datos y obtener conexiones a los datos. La mayoría de los objetos definidos en esta librería son definidos como objetos "GX". Los objetos GX implementan la interfaces IGXObject, las cuales les permiten ser manipulados dentro de *Catalog*.
- **CatalogUI:** Esta librería contiene interfaces de usuario para acceder a los objetos de la librería *Catalog*. Entre las interfaces se encuentran paginas de propiedades y cajas de dialogo, particularmente las GXDialog, que son utilizadas para la interacción con los catálogos de datos. Los objetos GXDialog permiten la funcionalidad "Add Data" común en todas las aplicaciones ArcGIS. Muchos de los comandos y menús disponibles en la aplicación ArcCatalog se definen en esta librería.
- **CartoUI:** Esta librería contiene interfaces de usuario para acceder a los objetos de la librería *Carto*. Dentro de las interfaces se encuentran las páginas de propiedades y numerosas cajas de dialogo, entre ellas la "IdentifyDialog", disponibles para uso del desarrollador.

- **DataSourcesRasterUI:** Esta librería contiene interfaces de usuario para acceder a los objetos de la librería *DataSourcesRaster*. Dentro de las interfaces se encuentran las páginas de propiedades y numerosas cajas de dialogo, entre ellas la “*RasterSdeLoader*” y “*SidEncoder*”, disponibles para uso del desarrollador.
- **ArcCatalogUI:** Esta librería contiene interfaces de usuario específicas para acceder a la aplicación *ArcCatalog*.
- **ArcCatalog:** Esta librería contiene la aplicación *ArcCatalog*, entre ellos los objetos “*Application*” y “*Document*”. Contiene la interfaz *IGXApplication*, la cual está definida en la librería *ArcCatalogUI*, puesto que los objetos de esta última utilizan la interfaz *IGXApplication* para interactuar con la aplicación *ArcCatalog*.
- **ArcMapUI:** Esta librería provee interfaces de usuario específicas para acceder a la aplicación *ArcMap*. Los componentes contenidos en esta librería no pueden ser utilizados fuera del contexto de *ArcMap*. Las interfaces *IMXApplication* y *IMXDocument* están definidas en esta librería, aunque son implementadas en la librería *ArcMap*. La tabla de contenidos de *ArcMap* también es implementada en esta librería. Los desarrolladores extienden esta librería cuando crean comandos y herramientas personalizadas para usarlas dentro de la aplicación *ArcMap*.

3.5 INTRODUCCIÓN A LA HERRAMIENTA SOFTWARE DE PLANEACIÓN RADIO PARA SISTEMAS DE ACCESO INALÁMBRICO FIJO EN AMBIENTES RURALES

En este trabajo de grado se propuso el desarrollo de una herramienta software soportada en un Sistema de Información Geográfica que permita agilizar los procesos de diseño y planificación de Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo en entornos rurales. El sistema SIG escogido como soporte fue *ArcGIS Dektop* (*Arclnfo*) en la versión 9.2. El proceso de modelamiento de software se hizo siguiendo algunos lineamientos del Proceso Unificado de Desarrollo (*RUP*, *Rational Unified Process*), los cuales se detallan en la parte B del Anexo 1. A continuación se realiza la presentación de este proyecto software:

Nombre del Proyecto: Herramienta Software de Planeación Radio para Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo en Ambientes Rurales

Ciente del Proyecto: Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

Metas del Proyecto: El objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema que ayude a los diseñadores de redes en el proceso de diseño y planificación de Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo (FWA, *Fixed Wíreles Access*) en entornos rurales, mediante la automatización de procesos indispensables para la determinación de la viabilidad de un enlace.

La automatización de procesos estará basada en la capacidad de emplear la información geográfica disponible en un Modelo de Elevación Digital (DEM, *Digital Elevation Model*) en formato de Red Irregular Triangulada (TIN, *Triangulated Irregular Network*), para obtener el perfil del trayecto entre el transmisor y receptor, calcular el valor de las pérdidas de trayecto, y hacer la estimación de la potencia recibida, el margen de desvanecimiento y la disponibilidad del trayecto obtenidos a partir del presupuesto ó balance del radioenlace (RLB, *Radio Link Budget*).

Para el cálculo de las pérdidas de trayecto el sistema deberá permitir al usuario escoger entre 7 modelos de propagación disponibles: Espacio libre (Friss), Lee, ECC-33, Ericsson, SUI, 2D Anderson (para casos de línea de vista) y Longley Rice (para sistemas dentro de la región de visibilidad).

Adicionalmente para permitir una mejor visualización del DEM que se va a utilizar, la herramienta debe permitir la ejecución de funciones básicas sobre el DEM como: selección de un DEM, ampliación, identificación de puntos sobre la superficie, registro visual de eventos, movimiento de la vista del DEM y vista de la totalidad del DEM.

Captura de Requerimientos:

1. Realizar un sistema informático completo que ayude al diseñador de redes en la planificación de radioenlaces.
2. Realizar funciones de manipulación de un DEM como:
 - Selección de un DEM de trabajo.
 - Ampliación de una parte de la superficie.
 - Identificación de puntos sobre la superficie.
 - Registro visual de eventos.
 - Movimiento de la vista del DEM.
 - Vista de la totalidad del DEM.

3. Calcular el perfil del trayecto a partir de un DEM en formato TIN.
4. Calcular las pérdidas de trayecto de un sistema FWA en un entorno rural, aplicando alguno de los siguientes modelos de propagación:
 - Espacio libre (Friss)
 - Lee
 - ECC-33
 - Ericsson
 - SUI
 - 2D Anderson (para casos de línea de vista)
 - Longley Rice (para sistemas dentro de la región de visibilidad)
5. Determinar la potencia de recepción, el margen de operación del sistema y la disponibilidad del trayecto.

4. PRUEBAS

4.1 CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN

El proceso de diseño de un Sistema de Acceso Inalámbrico Fijo mediante la Herramienta Software de Planeación Radio para Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo en Ambientes Rurales implica la consideración previa de los modelos, que según los rangos de frecuencia recomendados en el capítulo 2, aplican para cada una de las bandas de frecuencia tenidas en cuenta en este proyecto (2.4, 3.5 y 5.8 Ghz). Los modelos aplicables en cada banda se muestran en la tabla 19.

Modelo de Propagación	2.4 Ghz	3.5 Ghz	5.8 Ghz
Longley Rice	x	x	x
2D Anderson	x	x	x
Lee	x	x	x
ECC-33	x	x	
SUI	x		
Ericsson	x		

Tabla 19. Bandas de frecuencia aplicables según el modelo de propagación.

Nota: Se debe notar que el valor de frecuencia máximo para el modelo de Ericsson, según su definición en el capítulo 2, es de 2 Ghz; sin embargo podría ser utilizado en la banda de 2.4 Ghz.

Por otro lado, cada modelo de propagación considera unos rangos de distancia donde se obtiene una mayor precisión en la predicción de las pérdidas de trayecto, los cuales se muestran en la tabla 20.

Modelo de Propagación	Rango de Distancia [Km]
Longley Rice	1 - 2000
2D Anderson	No definido
Lee	No definido
ECC-33	< 10
SUI	< 10
Ericsson	No definido

Tabla 20. Rangos de distancia aplicables según el modelo de propagación

La aplicación de alguno de estos modelos de propagación en situaciones cuyos parámetros (frecuencia, distancia, altura de antenas, etc.) se encuentren por fuera de los rangos definidos por el modelo, es responsabilidad del diseñador.

4.2 EVALUACIÓN DE UN RADIO ENLACE ENTRE CAJETE Y EL MUNICIPIO DE PURACÉ DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA EN LA BANDA DE 2.4 GHZ

Para evaluar el correcto funcionamiento de la herramienta, se tomarán los datos de una radioenlace implementado por el grupo GNTT (Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones) entre Cajete y el municipio de Puracé del departamento del Cauca, el cual funciona en la banda de 2.4 Ghz con la tecnología FWA IEEE 802.11g y con una distancia entre la estación transmisora y receptora de 25.18 km. La altura de las antenas de las dos estaciones es de 2.5 m

con ganancias de 17 dBi y polarización vertical. La potencia de transmisión es de 400 mW. Las características del terreno se describen en el numeral 2.3.1 del capítulo 2.

Para utilizar la Herramienta Software de Planeación Radio para Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo en Ambientes Rurales, se requiere ingresar las coordenadas planas de los sistemas transmisor y receptor, por lo tanto se realizó la conversión de las coordenadas geográficas a coordenadas planas con datum Bogotá y origen oeste, utilizando el servicio online de calculadora geodésica de la compañía MultiProcesos SIG S.A.¹⁷. De esta forma se obtuvieron los siguientes datos:

- Coordenadas geográficas originales de las estaciones:
 - Cajete. Latitud: 2° 28' 2.90" N y longitud 76° 39' 15.06" O.
 - Puracé. Latitud: 2° 22' 55.10" N y longitud 76° 26' 39.40" O.
- Coordenadas planas obtenidas por la calculadora geodésica:
 - Puracé. Norte: 755168,599 m, Este: 1070443,869 m.
 - Cajete. Norte: 764614,732 m, Este: 1047093,304 m.

En la figura 26 se muestra la interfaz de la herramienta con los datos del radio enlace y el modelo de elevación digital del Cauca en formato TIN, obtenido a partir de curvas de nivel con equidistancias de 25 m.

El perfil del trayecto (Puracé – Cajete) para este radio enlace arrojado por la herramienta se detalla en la figura 27.

En la figura 28 se muestra la visibilidad entre el transmisor y receptor por medio de una línea de color verde y rojo, los segmentos de color verde son trayectos visibles para los puntos extremos del sistema de comunicación y los de color rojo no son visibles para el transmisor ó para el receptor, representando una depresión ó un obstáculo. Además la herramienta muestra una ventana donde especifica que los dos extremos del radioenlace son visibles.

¹⁷ <http://www.sumapa.com>

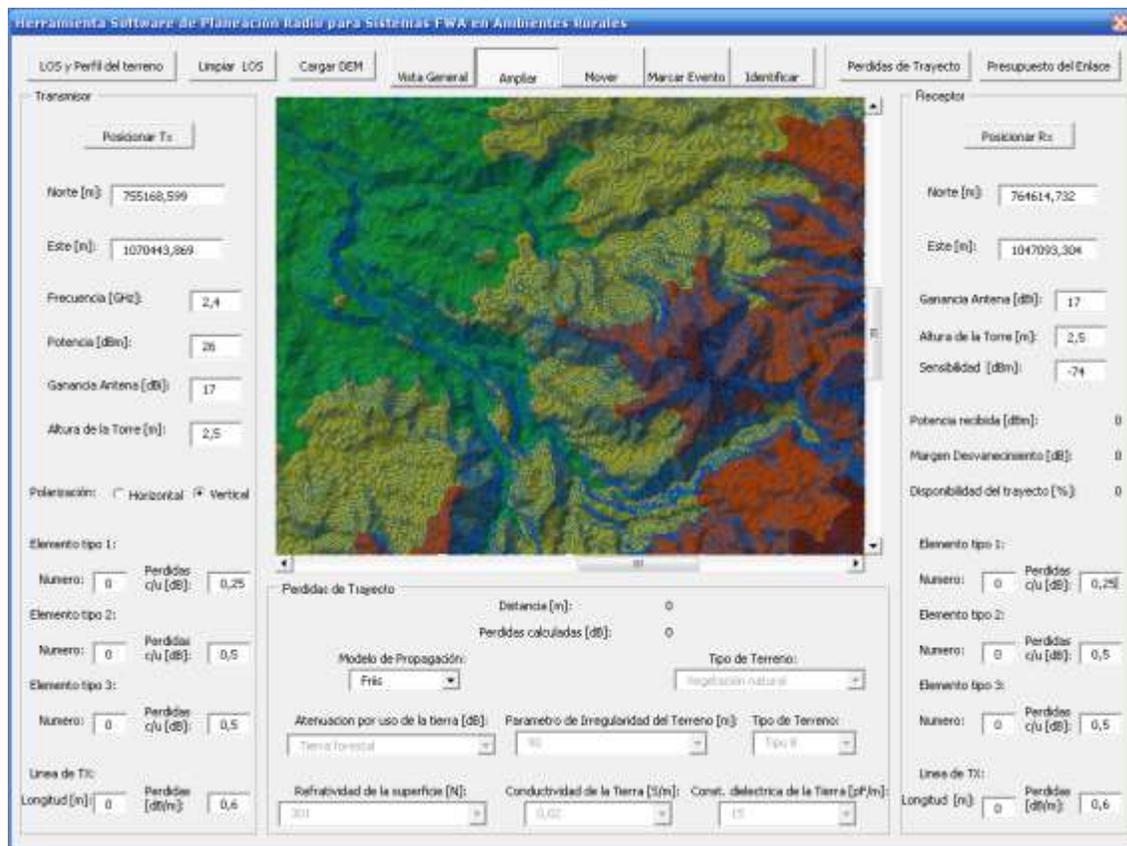


Figura 26. Interfaz de la herramienta

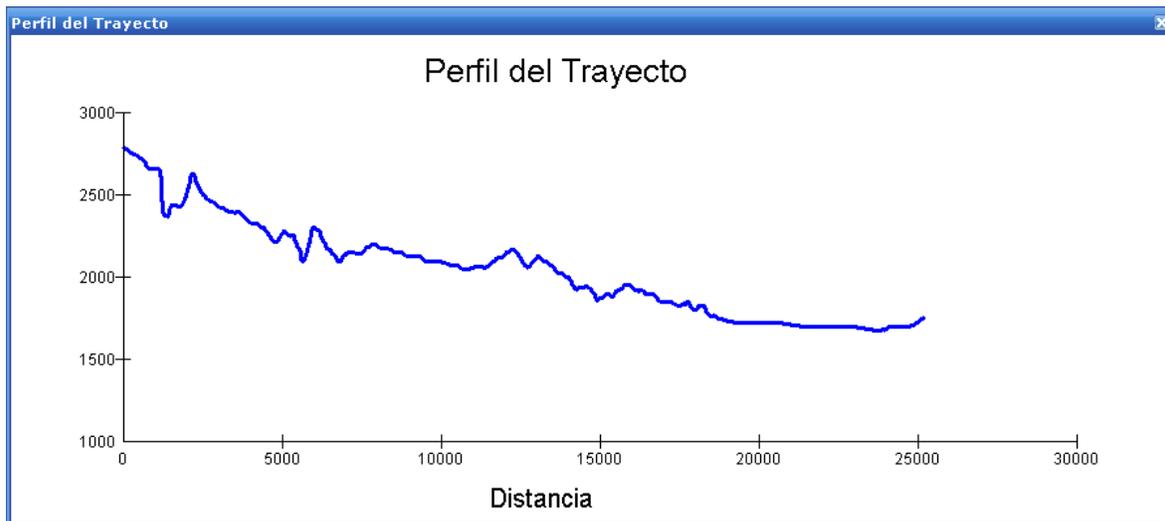


Figura 27. Perfil del trayecto de propagación.



Figura 28. Línea de visualización entre el transmisor y el receptor.

4.2.1 Análisis de los modelos de propagación: En esta parte se realizará la comparación de los resultados de las pérdidas de trayecto obtenidas por la herramienta para los modelos de propagación: Longley Rice, 2D Anderson, Lee cuyos rangos de frecuencia y distancia se adaptan a las condiciones del radioenlace en estudio. Para el cálculo de la altura efectiva del transmisor, la Herramienta Software de Planeación Radio para Sistemas de Acceso Inalámbrico Fijo en Ambientes Rurales utiliza el método descrito en la recomendación UIT-R P.1546-3.

Los valores de pérdidas de trayecto para estos modelos se muestran en la tabla 21.

Modelo de Propagación	Pérdidas de Trayecto (dB)
Espacio libre	128
Lee	136.76
Longley Rice	147.01
2D Anderson	145.19
Pérdida del trayecto real	133

Tabla 21. Pérdidas de trayecto en la banda de 2.4 Ghz.

En la figura 29 se ilustra un diagrama de barras que compara las pérdidas de trayecto obtenidas con los diferentes modelos de propagación.

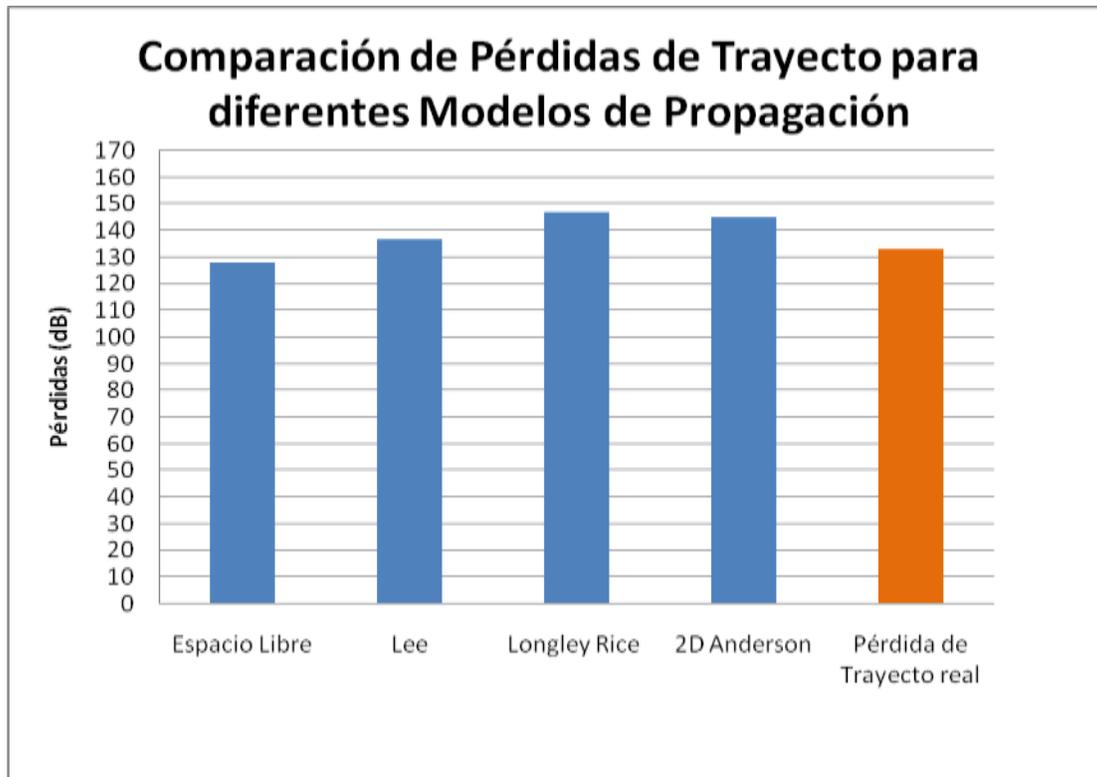


Figura 29. Comparación de pérdidas de trayecto en la banda de 2.4 Ghz.

Según la figura 29 se observa que para este sistema inalámbrico funcionando en un ambiente de propagación rural en la banda de 2.4 Ghz:

- La mayor aproximación a las pérdidas reales se da con el valor de pérdidas calculado por el modelo empírico de Lee, con una diferencia de 3.76 dB con respecto a las pérdidas de trayecto reales.
- Los modelos 2D Anderson y Longley Rice presentan una diferencia de 12.19 dB y 14.1 dB respectivamente, siendo estos modelos los que más se alejan del valor de las pérdidas reales.
- Los modelos 2D Anderson y Longley Rice tienen valores de pérdidas cercanos, con una diferencia de 1.82 dB entre ellos y una media de 146.1dB.

Nota: Se puede observar que los valores de pérdidas calculados por la herramienta software para cada modelo de propagación difieren de aquellos resultados obtenidos de manera manual en el punto 2.3.1 del capítulo 2. Esto se debe principalmente a:

- La utilización de información real del perfil del terreno como insumo para los parámetros de los modelos, lo que supone un acercamiento a las

condiciones reales del entorno de propagación. En el punto 2.3.1 del capítulo 2 muchos de los valores necesarios como parámetros de entrada a los modelos fueron estimados según criterios y apreciaciones del diseñador, puesto que no se contaba con la herramienta software para el procesamiento.

- El cálculo de las alturas efectivas fue realizado por la herramienta software utilizando el método descrito en la recomendación UIT-R P.1546-3, mientras que en el punto 2.3.1 del capítulo 2, se utilizaron valores de alturas efectivas obtenidas a través de la herramienta de planificación de radioenlaces SPLAT RF¹⁸.

4.2.2 Análisis del Balance de Potencia del Enlace: Para el balance del enlace se utilizó una sensibilidad del receptor de -95 dBm correspondiente a una velocidad de 5.5 Mbps. No se consideraron pérdidas por conectores y por línea de transmisión debido a que el transmisor y el receptor utilizados tienen integrado el sistema radiante. Con los anteriores datos y haciendo uso de los diferentes modelos de propagación se obtuvo el margen de desvanecimiento. La disponibilidad del trayecto se calculó empleando el método de la UIT-R P.530-8 con una rugosidad de terreno (S) de 20. Estos valores se muestran en la tabla 22.

Modelo de Propagación	Potencia Recibida (dBm)	Margen de Desvanecimiento (dB)	Disponibilidad del Trayecto (%)
Espacio libre	-68.07	26.92	99.996
Lee	-76.76	18.23	99.975
Longley Rice	-87.01	7.98	99.739
2D Anderson	-85.17	9.8	99.828
Medidas reales	-73	22	99.989

Tabla 22. Resultados del presupuesto del radio enlace.

¹⁸ [http:// www.qsl.net/kd2bd/splat](http://www.qsl.net/kd2bd/splat).

Según la tabla 22 se observa que para una sensibilidad de -95 dBm, el modelo más optimista en cuanto a potencia de recepción es el de pérdidas de espacio libre. Esto provoca que el margen de desvanecimiento y la disponibilidad del trayecto calculados sean elevados y se encuentren muy por encima de los valores reales.

Por otro lado con el modelo de Lee se obtiene el valor de potencia recibida más cercano a la realidad, con una diferencia de 3.76 dBm. Esto se refleja en los valores de margen de desvanecimiento y disponibilidad del trayecto más cercanos a los reales, con una diferencia de 3.77 dB y 0.014% respectivamente.

Para los modelos restantes se obtiene un margen de desvanecimiento que va desde 7.98 dB hasta 9.8 dB y una disponibilidad de trayecto desde 99.739% hasta 99.829% respectivamente, resaltando la viabilidad del radio enlace.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

- Los sistemas FWA tienen un gran impacto social, puesto que representan una alternativa de comunicación que permite la disminución de la exclusión digital en países en vía de desarrollo y en estos en sus zonas rurales y aisladas, a través de los servicios que sobre estos sistemas se pueden desplegar: telefonía convencional, Internet, servicios interactivos, televisión, entre otros.
- Los sistemas FWA actualmente tienen una gran importancia tecnológica por las ventajas que conlleva su utilización por parte de las empresas de telecomunicaciones frente a las tecnologías cableadas. Sus principales beneficios se basan en los bajos costos de despliegue, la posibilidad de llegar a lugares remotos, la flexibilidad en el diseño y la capacidad de ofrecer múltiples servicios.
- Existen bandas de frecuencias, de tipo licenciado y no licenciado, utilizables a nivel mundial, que permiten la utilización de tecnologías orientadas a servicios fijos, las cuales potencializan la implementación de sistemas FWA y el mejoramiento de los sistemas existentes.
- La estandarización en el desarrollo de los sistemas FWA permite la disminución de costos en equipos para el cliente por la generación de economías de escala y motiva la inversión de empresas prestadoras de servicio en nuevos entornos.
- Actualmente existen diferentes tecnologías FWA estandarizadas de gran aceptación como las pertenecientes al grupo de trabajo IEEE 802.16 e IEEE 802.11, además de los estándares: ETSI BRAN HIPERLAN/2, ETSI BRAN HIPERACCESS, ETSI BRAN HIPERMAN, ETSI BRAN HIPERLINK,

que aseguran la diversidad tecnológica y la posibilidad de seleccionar la más adecuada a una situación particular.

- La alta escala de integración de circuitos integrados, el actual desarrollo tecnológico y el desarrollo de tecnologías inalámbricas en los últimos años, seguirá impulsando la investigación y desarrollo de adaptación y aplicación de este tipo de tecnologías para disminuir la brecha digital.
- El proceso de diseño de un sistema FWA gira en torno al cálculo del presupuesto ó balance del radioenlace, donde se deben considerar los aportes de cada elemento del sistema para alcanzar los objetivos de diseño y de calidad deseados.
- El modelo de predicción de propagación reviste gran importancia en el diseño de un sistema FWA puesto que permite estimar las pérdidas que tendrá una señal al atravesar el medio, las cuales son determinantes para el cálculo del presupuesto ó balance del radioenlace y por lo tanto del dimensionamiento del sistema.
- La selección del modelo de predicción de propagación es una labor de alta importancia y repercusión en el diseño de los sistemas FWA, que requiere la valoración de los siguientes aspectos en cada modelo: información requerida por el modelo, rangos de parámetros de entrada recomendados del modelo y recomendación de aplicación hacia alguna tecnología específica.
- En el diseño de sistemas FWA en general, un modelo no es completamente aplicable porque no se posee la información requerida, se exceden los rangos ó se trata de una tecnología diferente. En estos casos el diseñador tendrá que decidir el valor de los parámetros faltantes ó la determinación de aplicar el modelo a pesar de las inconsistencias.
- El perfil del trayecto es indispensable para la aplicación de los modelos de predicción de propagación. En el caso de los modelos empíricos es requerido para el cálculo de alturas y distancias, y en los modelos semi-empíricos y determinísticos, para la determinación de parámetros específicos requeridos por cada modelo como la altura al punto de obstrucción más alto, la determinación de un punto de reflexión sobre la superficie y el cálculo de una obstrucción parcial.
- El empleo de un modelo de elevación digital permite la obtención de datos del terreno necesarios para los modelos de propagación, logrando que los resultados obtenidos por estos sean más cercanos a la práctica. Cualquier

suposición de algún parámetro se debe manejar con cuidado puesto que introducirá una desviación en el resultado.

- Un sistema de información geográfico es de gran utilidad en el proceso de diseño y planificación de sistemas FWA, puesto que permite capturar, gestionar, manipular, analizar y presentar información geográfica referenciada relevante para el posicionamiento de los sistemas transmisor y receptor, el análisis de visibilidad entre sistemas, la visualización del perfil del trayecto y la utilización de variables geográficas necesarias como parámetros de entrada a modelos de propagación.
- ArcGIS Desktop es un Sistema de Información Geográfica (SIG), con variadas funciones para la edición y el geoprocésamiento de información espacial, utilizables para construir componentes personalizados a través de un API y orientados a resolver problemas específicos.
- La herramienta software permite la planificación de sistemas FWA en entornos rurales, utilizando para esto las pérdidas de trayecto calculadas por diferentes modelos de propagación y funcionalidades para el cálculo del perfil del trayecto, margen de desvanecimiento y disponibilidad del trayecto, además, cuenta con funciones para facilitar la visualización más apropiada de los datos geográficos.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

- En este trabajo de grado se han estudiado e implementado algunos de los modelos de propagación disponibles para sistemas FWA en entornos rurales, sin embargo existen muchos más modelos de propagación, algunos con mayor popularidad que otros, que igualmente pueden ser de gran utilidad en la estimación de las pérdidas de trayecto para entornos del mismo tipo (involucrando posiblemente otras variables de entrada) y que valdrían la pena implementar e integrar a la herramienta realizada para aumentar las posibilidades que tenga el diseñador de redes en el momento de calcular las pérdidas de trayecto.
- Aunque en este trabajo de grado se han considerado los aspectos de disponibilidad del trayecto relacionados específicamente al trayecto de propagación, sería útil e interesante realizar la expansión de la herramienta

para que contenga aspectos relacionados con la disponibilidad de equipos, y se conduzca al cálculo de la disponibilidad total.

- Para el cálculo de las pérdidas de trayecto a través de los modelos de propagación implementados en la herramienta se utiliza información geográfica disponible en el modelo de elevación digital, sin embargo otro tipo de información relacionada a propiedades puntuales de la superficie (constante dieléctrica, conductividad y refractividad, rugosidad de la superficie, clima) debe ser ingresada por el usuario, por lo tanto sería interesante adquirir nuevas capas con información georeferenciada que contenga valores para estos parámetros, y de esta forma se facilite el diseño de los sistemas FWA basado en datos reales del terreno.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Harry R. Anderson. "Fixed broadband wireless system design". Editorial: JohnWiley & Sons Ltd. 2003.
- [2] Roberto Bustamante Miller PhD y Roberto Carlos Hincapié Reyes MSc. "Análisis, modelamiento y simulación de redes enmalladas basadas en el estándar 802.16-2004". Documento disponible en: <http://www.icesi.edu.co/esn/contenido/pdfs/Analisismodelsimulacionredes.pdf>
- [3] Sebastian Buettrich. "Unidad 06: Cálculo de Radioenlace". Octubre de 2007 Documento disponible en: http://www.eslared.org.ve/tricalcar/06_es_calculo-de-radioenlace_guia_v01%5B1%5D.pdf
- [4] "Modulacion Digital". Documento disponible en: <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/MODULACION-DIGITAL-FSK-PSK-QAM.php>
- [5] Escuela de Ingeniería Electrónica - Universidad Nacional de Rosario. "Propagación de ondas en medio natural". Documento disponible en: <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Antenas%20y%20Propagacion/Propagacion.pdf>
- [6] Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones - Universidad de Vigo. "Radio Enlaces Terrenales". Documento disponible en: <http://www.grp.tsc.uvigo.es/rtvs/docs/tema3.pdf>
- [7] J. Alpuente - Grupo de Electromagnetismo – Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones. "Fenómeno de la difracción". Documento disponible en: <http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/ittst/po/apuntes/Difraccion.pdf>
- [8] Capitulo 3. "Modelos de propagación para exteriores". Documento disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/campos_v_da/capitulo_3.pdf
- [9] J. C. García, O. A. Rodríguez, J. L. Castillo - Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. "Desempeño de Modelos de Propagación en Comunicación Móvil para la zona de Caldas Parte 1: Modelos para áreas

- urbanas”. Documento disponible en:
<http://www.docentes.unal.edu.co/jcgarciaa/docs/Papers/ID016.pdf>
- [10] Alexánder Galvis Quintero, Cristina Gómez Santamaría, Roberto Carlos Hincapié Reyes. “Modelos de canal inalámbricos y su aplicación al diseño de redes WiMAX”. Documento disponible en:
http://dspace.icesi.edu.co/dspace/bitstream/item/1006/1/modelos_canal_inal_mabrico_wimax.PDF
- [11] Alexandre Wagemakers y Borja Ibarz. “Modelos de Propagación electromagnética”. 29 de octubre de 2007. Documento disponible en:
<http://www.escet.urjc.es/~fisica/Docencia/ITeleco/tema3.pdf>
- [12] Capitulo 5. “Modelos de propagación”. Documento disponible en:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/capitulo_5.html#
- [13] I.J. Wassell, D. Crosby, M.P. Sellars, M.G. Brown. “Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems”. 30 de Mayo de 2005. Documento disponible en:
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1543252
- [14] IK. V. S. Hari- Universidad de Stanford. “Interim Channel Models for G2 MMDS Fixed Wireless Applications”. Noviembre de 2000. Documento disponible en: http://wirelessman.org/tg3/contrib/802163p-00_49.pdf
- [15] Josip Milanovic, Snjezana Rimac-Drlje y Krunoslav Bejuk. “Comparison of Propagation Models Accuracy for WiMAX on 3.5 Ghz”. Diciembre de 2007. Documento disponible en:
<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/4456901/4510892/04510943.pdf?arnumber=4510943>
- [16] Vinko Erceg. IEEE. “An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments,”. Julio de 1999. Documento disponible en: <http://wsl.stanford.edu/~ee359/greenshad.pdf>
- [17] Telefonica Movil. “ANEXO 3.6 Memoria de Cálculo”. Disponible en:
http://www.subtel.cl/prontus_procesostarifarios/site/artic/20070205/asocfile/20070205104103/3_6_1a_anexo_pub_mem_proytec.pdf
- [18] Jose Maria Hernando Rábanos. “Comunicaciones Moviles”. Editorial Centro de estudios Ramon Areces S.A. 1997.
- [19] Hugo Durney W., César Castro G. y Roger Ortiz S “Diseño e implementación de radioenlaces y estaciones repetidoras Wi-Fi para conectividad de escuelas rurales en zona sur de Chile”. Documento disponible en:
<http://antigua.senacitel.cl/downloads/senacitel2006/T-37.pdf>

- [20] George Hufford. "The ITS Irregular Terrain Model, version 1.2.2. The Algorithm". Documento disponible en: http://flattop.its.blrdoc.gov/itm/itm_alg.pdf
- [21] Recomendación UIT-R P.526-6. "Propagación por difracción". 1999
- [22] TIA TR8 Working Group 8.8 y Technology Compatibility. "A report on technology independent methodology for the modeling, simulation and empirical verification of wireless communications system performance in noise and interference limited systems operating on frequencies between 30 and 1500 Mhz". 20 de Mayo de 1997. Documento disponible en: http://www.antd.nist.gov/wctg/manet/docs/TIAWG88_20.pdf.
- [23] Universidad de Cádiz – Facultad de Filosofía y Letras. "Historia de los SIG. Cartografía y SIG en España". Documento disponible en: <http://www2.uca.es/dept/filosofia/TEMA%202.pdf>
- [24] Alvaro de J. Carmona y Jhon Jairo Monsalve R. "Sistemas de información geográficos". Documento disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos/gis/gis.shtml>. 2050
- [25] GeoTecnologías SA. "Generalidades del SIG" disponible en: <http://www.geotecnologias.com/Documentos/GIS.pdf>
- [26] Empresas de Navarra. "Que es un SIG". Pdf disponible en: <http://www.navactiva.com/web/es/descargas/pdf/atic/sig1.pdf>
- [27] Roberto Tinoco Guevara. "Definición y algunas aplicaciones de los sistemas de información geográfica". Documento disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos14/informageogra/informageogra.shtml#def>