

**ANÁLISIS DE COBERTURA DE UN SISTEMA WI-FI EN INTERIORES,
MEDIANTE LA TÉCNICA DE TRAZADO DE RAYOS**



**Santiago Andrés Agredo Parra
Javier Alberto Luna Bonilla**

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas - GRIAL
Línea de Investigación: Señales y Sistemas de Acceso y Difusión
Basados en Radio
Popayán, 2011**

**ANÁLISIS DE COBERTURA DE UN SISTEMA WI-FI EN INTERIORES,
MEDIANTE LA TÉCNICA DE TRAZADO DE RAYOS**



**Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título
de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Santiago Andrés Agredo Parra
Javier Alberto Luna Bonilla**

Director

Víctor Manuel Quintero Flórez

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas - GRIAL
Línea de Investigación: Señales y Sistemas de Acceso y Difusión
Basados en Radio
Popayán, 2011**

TABLA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 EVOLUCIÓN DE LAS REDES INALÁMBRICAS	1
1.3 TIPOS DE REDES INALÁMBRICAS	4
1.3.1 Redes de Área Amplia (WAN).....	4
1.3.2 Redes de Área Local Inalámbrica (WLAN).	5
1.3.3 Redes de Área Personal (PAN)	5
1.4 NORMATIVIDAD DE REDES INALÁMBRICAS	6
1.4.1 IEEE 802.11a	6
1.4.2 IEEE 802.11b	7
1.4.3 IEEE 802.11g	7
1.4.4 IEEE 802.11n	8
1.5 PRINCIPIOS DE PROPAGACIÓN	9
1.5.1 Pérdidas de Propagación	10
1.5.2 Pérdidas por Configuración del Terreno	12
1.5.3 Pérdidas por Efecto Multitrayectoria	16
1.6 DESVANECIMIENTO	17
1.7 DISPERSIÓN DE RETARDO	18
2. TÉCNICA DE TRAZADO DE RAYOS	19
2.1 INTRODUCCIÓN	19
2.2 TRAZADO DE RAYOS	20
2.2.1 Óptica Geométrica	21
2.2.1.1 <i>Campo Eléctrico de un Rayo Directo</i>	23
2.2.1.2 <i>Campo Eléctrico de un Rayo Reflejado</i>	25
2.2.1.2 <i>Campo Eléctrico de un Rayo Refractado</i>	26
2.2.2 Teoría Uniforme de la Difracción.....	27

2.2.2.1	<i>Fronteras de Transición</i>	27
2.2.2.2	<i>Campo Eléctrico de un Rayo Difractado</i>	28
2.3	MÉTODOS BASADOS EN TEORÍA DE RAYOS	31
2.3.1	Métodos de Predicción de Trazado de Rayos.....	31
2.3.1.1	<i>Método de Disparo y Rebote de Rayos</i>	32
2.3.1.2	Método de Lanzado de Rayos	32
2.3.1.3	<i>Método de Imágenes</i>	33
2.4	MODELOS DE PROPAGACIÓN	34
2.4.1	Modelos Estadísticos	35
2.4.2	Modelos Empíricos.....	36
2.4.3	Modelos Determinísticos	36
2.5	MODELOS DE PROPAGACIÓN UTILIZADOS POR LA HERRAMIENTA WIRELESS INSITE®	37
2.5.1	Modelo de Espacio Libre.....	37
2.5.2	Modelo de Cañón Urbano	38
2.5.3	Modelo Urbano Rápido 3D.....	39
2.5.5	Modelo Completo 3D	42
2.4.6	Modelo Hata.....	43
3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN Y MEDIDAS REALES	45
3.1	INTRODUCCIÓN	45
3.2	METODOLOGÍA DE DESARROLLO	45
3.2.1	Análisis de Requerimientos.....	46
3.2.2	Diseño.....	47
3.2.2.1	<i>Identificación del Escenario de Simulación</i>	47
3.2.2.2	<i>Parámetros del Sistema</i>	48
3.2.3	Implementación.....	50
3.2.3.1	<i>Modelado de la Estructura</i>	51
3.2.3.2	<i>Construcción de la Estructura</i>	52
3.2.4	Pruebas.....	53

3.2.4.1	<i>Plan de Pruebas</i>	53
3.2.4.2	<i>Simulaciones</i>	54
3.2.4.2.1	<i>Simulación 1: mejor cobertura</i>	54
3.2.4.2.2	<i>Simulación 2: cobertura no favorable</i>	57
3.2.4.2.3	<i>Simulación 3: cobertura media</i>	60
3.2.4.3	<i>Medidas Reales</i>	62
3.2.4.3.1	<i>Medidas en la Simulación 1: mejor cobertura</i>	62
3.2.4.3.1	<i>Medidas de la Simulación 2: cobertura no favorable</i>	63
4.	ANÁLISIS DE MEDIDAS Y RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESCENARIO DE INTERIORES	65
4.2	VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE TRAZADO DE RAYOS	66
4.3	CARACTERIZACIÓN DEL CANAL	76
4.3.1	Dispersión de Retardo	80
4.3.2	Ancho de Banda de Coherencia	84
5.	CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS PROPUESTOS	88
5.1	INTRODUCCIÓN	88
5.2	CONCLUSIONES	89
5.3	FUTUROS TRABAJOS PROPUESTOS	90
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Clasificación de las redes inalámbricas.....	6
Figura 1.2	Reflexión de ondas sobre una superficie reflectora.....	13
Figura 1.3	Difracción de ondas electromagnéticas.....	14
Figura 1.4	Dispersión de ondas electromagnéticas.....	15
Figura 1.5	Refracción de ondas electromagnéticas.....	15
Figura 1.6	Desvanecimiento rápido	17
Figura 2.1	Rayos correspondientes a ondas esféricas y ondas planas.....	22
Figura 2.2	Representación de rayos reflejados y refractados sobre el plano de incidencia con polarización TM y TE respectivamente.....	24

Figura 2.3	Reflexión especular y reflexión difusa	25
Figura 2.4	Fronteras de transición.....	28
Figura 2.5	Difracción producida por la incidencia oblicua de un rayo con el borde de un obstáculo	29
Figura 2.6	Representación gráfica del método de disparo y rebote de rayos.....	32
Figura 2.7	Representación gráfica del método de imágenes.....	34
Figura 2.8	Escenario urbano	38
Figura 2.9	Escenario urbano con edificaciones o colinas de altura no uniforme ..	40
Figura 2.10	Difracción en bordes de edificaciones de baja altura	40
Figura 3.1	Modelo lineal secuencial o ciclo de vida.....	46
Figura 3.2	Secuencia de Barker	49
Figura 3.3	Canalización y Técnica DSSS para IEEE 802.11b.....	49
Figura 3.4	Plano en dos dimensiones del escenario de simulación	52
Figura 3.5	Escenario de trabajo modelado en Wireless InSite®	53
Figura 3.6	Ubicación del transmisor en la simulación 1.....	54
Figura 3.7	Cobertura del sistema en la simulación 1	55
Figura 3.8	Ubicación puntual de receptores	55
Figura 3.9	Trazado de rayos en el escenario para los 21 receptores en la simulación 1	56
Figura 3.10	Potencias de recepción puntuales en la simulación 1	56
Figura 3.11	Ubicación del transmisor en la simulación 2.....	58
Figura 3.12	Cobertura del sistema en la simulación 2.....	58
Figura 3.13	Ubicación puntual de receptores en la simulación 2.....	59
Figura 3.14	Trazado de rayos para 13 receptores en la simulación 2	59
Figura 3.15	Potencias de recepción puntuales en la simulación 2	60
Figura 3.16	Ubicación del transmisor en la simulación 3.....	61
Figura 3.17	Cobertura del sistema en la simulación 3.....	61
Figura 3.18	Potencia de recepción real en la simulación 1	63
Figura 3.19	Potencia de recepción real en la simulación 2	63
Figura 4. 1	Ubicación puntual de receptores en la simulación 1.....	66
Figura 4. 2	Desviación estándar y potencia de recepción promedio medida.....	71
Figura 4. 3	Desviación estándar y potencia de recepción promedio estimada	71
Figura 4. 4	Potencia de recepción medida y estimada	72
Figura 4. 5	Ubicación puntual de receptores en la simulación 2.....	72

Figura 4. 6 Desviación estándar y potencia de recepción medida en la simulación 2	75
Figura 4. 7 Desviación estándar y potencia promedio de recepción estimada en la simulación 2	75
Figura 4. 8 Potencia de recepción medida y estimada para la simulación 2	76
Figura 4. 9 Potencia de recepción en todos los puntos de la grilla	77
Figura 4. 10 Función de densidad de probabilidad de la potencia recibida	77
Figura 4. 11 Rutas de puntos de recepción	78
Figura 4. 12 Potencia de recepción contra distancia sobre la ruta 1 de puntos de recepción en línea de vista	78
Figura 4. 13 Potencia de recepción contra distancia sobre la ruta 2 de puntos de recepción sin línea de vista	79
Figura 4. 14 Potencia de recepción contra distancia sobre la ruta 3 de puntos de recepción con línea de vista y sin línea de vista	79
Figura 4. 15 Dispersión de Retardo contra distancia	80
Figura 4. 16 Dispersión de retardo	82
Figura 4. 17 Perfil de potencia retardo	83
Figura 4. 18 Ancho de banda de coherencia contra dispersión de retardo	86
Figura 4. 19 Ancho de banda de coherencia contra distancia	86
Figura 4. 20 Desvanecimiento selectivo en frecuencia	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación entre las tecnologías WLAN	8
Tabla 1.2 Absorción de materiales	13
Tabla 2.1 Contribuciones asociadas a cada una de las regiones de transición	28
Tabla 2.2 Parámetros modelo de espacio libre	37
Tabla 2.3 Parámetros modelo de cañón urbano	39
Tabla 2.4 Parámetros modelo urbano rápido 3D	41
Tabla 2.5 Parámetros modelo completo 3D	42
Tabla 2.6 Parámetros para el modelo Hata	44
Tabla 3.1 Frecuencia y canalización para IEEE 802.11 utilizando DSSS	49
Tabla 3.2 Configuración del transmisor y receptor	50
Tabla 3.3 Propiedades de los materiales utilizados	52

Tabla 3.4 Simulaciones más significativas del sistema.....	54
Tabla 3.5 Resultados en la simulación 1	57
Tabla 3.6 Resultados en la simulación 2	59
Tabla 3.7 Resultados de medidas reales en la simulación 1	62
Tabla 3.8 Resultados de medidas reales en la simulación 2	64
Tabla 4.1 Potencia de recepción estimada en la simulación 1 y medidas reales en los puntos de referencia	67
Tabla 4.2 Medida de error de cada punto de recepción de la simulación 1 respecto a las medidas reales	69
Tabla 4.3 Potencia de recepción estimada en la simulación y medidas reales en los puntos de referencia	73
Tabla 4.4 Resultados estadísticos para la simulación 2 con respecto a las medidas estimadas y reales	73
Tabla 4.5 Medida de error para cada punto de recepción de la simulación 2 respecto a las medidas reales.....	74
Tabla 4.6 Potencia de recepción estimada y dispersión de retardo en los puntos de medición.....	81
Tabla 4.7 Número de contribuciones de los receptores elegidos.....	82
Tabla 4.8 Ancho de banda de coherencia calculado en los puntos de la campaña de medición.....	85

LISTA DE ACRÓNIMOS

AP	<i>Access Points</i> , Puntos de Acceso.
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase Binario.
CCK	<i>Complementary Code Keying</i> , Modulación por Código Complementario.
CCIR	<i>Radio Consultative Committee</i> , Comité Constitutivo Internacional de Radiocomunicaciones.
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access, Collision Avoidance</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisión.
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase.
DS	<i>Delay Spread</i> , Dispersión de Retardo.
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> , Espectro Ensanchado por Secuencia Directa
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones.
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
GO	<i>Geometrical Optics</i> , Óptica Geométrica.
GTD	<i>Geometric Theory of Diffraction</i> , Teoría Geométrica de la Difracción.
HiperLAN	<i>High Performance Radio Local Area Network</i> , Redes de Área Local Inalámbrica de Alto Desempeño.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i> , interferencia intersímbolos.
IrDA	<i>Infrared Data Association</i> , Asociación de Datos por Infrarrojos.

ISB	<i>Incident Shadow Boundary</i> , frontera de sombra incidente.
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> , Industrial, Científica y Médica.
ITU	<i>International Telecommunications Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
LAN	<i>Local Area Network</i> , Red de Área Local.
LOS	<i>Line of Sight</i> , Línea de Vista.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> , Múltiple Entrada Múltiple Salida.
NLOS	<i>Not Line of sight</i> , no línea de vista.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales.
OSI	<i>Open System Interconnection</i> Interconexión de Sistemas Abiertos.
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
PAN	<i>Personal Area Network</i> , Red de Área Personal.
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i> , Asistente Digital Personal.
PDF	<i>Probability Density Function</i> , Función de Densidad de Probabilidad.
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
RSB	<i>Reflected Shadow Boundary</i> , Fronteras de Sombra Reflejada.
RT	<i>Ray Tracing</i> , Trazado de Rayos
SBR	<i>Shooting-and-Bouncing Ray</i> , Disparo y Rebote de Rayos.
UTD	<i>Uniform Theory of Diffraction</i> , Teoría Uniforme de Difracción.
WAN	<i>Wide Area Network</i> , Redes de Área Amplia.
WECA	<i>Wireless Ethernet Compability Alliance</i> , Alianza de Compatibilidad Ethernet Inalámbrica.

Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> , Fidelidad Inalámbrica.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , Red de Área Local Inalámbrica.
WLI	<i>Wireless Local Area Network Interoperability Forum</i> , Foro de Interoperabilidad de Redes de Área Local Inalámbrica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- *A nuestros padres y familiares por su cariño, apoyo y alegría constante, que nos dan la fortaleza para seguir adelante en la consecución de nuestras metas.*
- *A el ingeniero Víctor Manuel Quintero Flórez, director de este trabajo de grado, por su constante dedicación, orientación, enseñanza y apoyo.*
- *A los ingenieros de la FIET, en especial al departamento de Telecomunicaciones por sus valiosas orientaciones y enseñanzas.*
- *A nuestros amigos que con su compañía y apoyo han contribuido y acompañado nuestra etapa universitaria.*
- *A la Universidad del Cauca y a la empresa Remmcom® por permitir el uso de su herramienta Wireless InSite®.*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de las Redes de Área Local Inalámbrica¹ (WLAN, *Wireless Local Area Network*) se ha incrementado de forma exponencial a nivel mundial, brindando a los usuarios acceso a la información y a los recursos de una red en el momento requerido y sin la necesidad de una conexión cableada. A los operadores, las redes WLAN brindan flexibilidad, escalabilidad y bajo costo en la instalación, operación y mantenimiento, lo que permite aumentar la cobertura, capacidad y desempeño de las redes, aún en sitios de difícil acceso [1].

En la actualidad la mayoría de equipos ofimáticos y dispositivos de comunicación móvil se encuentran equipados con interfaces inalámbricas certificadas por la *Wi-Fi² alliance*³ lo que ha generado el uso elevado y la alta popularidad de las redes inalámbricas, con un número de usuarios creciente. Las redes de área local inalámbricas tienen un limitado alcance y muchas de ellas son implementadas sobre escenarios complejos tanto en el hogar como en la industria por lo tanto es necesario realizar estudios para su correcta planificación, diseño, despliegue y operación teniendo en cuenta los fenómenos y factores que se encuentran incursos en estos procesos [2], con el fin de lograr un óptimo desempeño.

Lo anterior ha dado origen a técnicas y procedimientos que permiten predecir el comportamiento de las señales radioeléctricas, las cuales en conjunción con modelos de propagación apropiados permiten estimar o predecir la cobertura de una red inalámbrica [2]. Los modelos de predicción y propagación permiten de manera aproximada estimar la cobertura de los Puntos de Acceso (AP, *Access Points*) y establecer la ubicación más adecuada de éstos, para lograr un rango específico de cobertura, con el fin de sacar el mayor provecho a la red y reducir los costos relacionados con su diseño, la implementación y operación.

Para facilitar la planificación de estas redes, se han desarrollado diversas herramientas software de análisis, diseño y planificación de sistemas de comunicaciones inalámbricas, las cuales permiten estimar o predecir la propagación de las ondas electromagnéticas a diferentes frecuencias, teniendo en cuenta los parámetros de los equipos involucrados en la transmisión, tales como potencia de transmisión, frecuencia de operación, ganancia de antenas, patrón de radiación de las antenas, altura de las antenas con respecto al suelo, y a la vez

¹ Wireless Local Area Network – IEEE 802.11 <http://www.ieee802.org/11/>.

² Fidelidad inalámbrica (Wi-Fi, *Wireless Fidelity*).

³ <http://www.wi-fi.org/>.

teniendo en cuenta las características de la zona de interés o escenario de despliegue [3].

En el proceso de planificación de una red inalámbrica, la precisión en la predicción de la cobertura es considerada como uno de los aspectos más relevantes. Con el fin de incrementar la precisión de los modelos de propagación, estos se complementan con los métodos de predicción para lograr, cada vez más, una mejor aproximación a los valores medidos en escenarios reales.

En este trabajo de grado se realizó un estudio de la técnica de trazado de rayos, métodos de predicción y modelos de propagación utilizados por la herramienta software Wireless InSite®, con la cual se estima la mejor ubicación del punto de acceso, para brindar la mejor cobertura dentro del escenario de interiores y los resultados obtenidos se validan con medidas reales haciendo uso de la plataforma inalámbrica PowerStation2®, demostrando de esta manera el alto grado de precisión que ofrece la técnica de trazado de rayos y los modelos de propagación asociados al escenario y a la herramienta de simulación en la predicción de la cobertura. Adicionalmente se realiza un análisis del canal de comunicación en donde se analizan los retardos de propagación, la multitrayectoria y por lo tanto los desvanecimientos que sufre la señal.



1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de redes de comunicación se ha convertido en una necesidad para la realización de actividades diarias de tipo laboral, educativa o personal, como una forma práctica de compartir información, recursos o servicios sin que sea necesario tener una conexión cableada y por el contrario se busca mayor movilidad y comodidad, factores que han contribuido a que día a día sean más los usuarios de las redes inalámbricas.

El uso de redes inalámbricas en relación a las redes cableadas, brindan no solo movilidad y comodidad, sino también facilidad en su instalación, flexibilidad, reducción de costos y escalabilidad; ventajas que han conllevado a una alta utilización de estas redes en el sector empresarial y la masiva producción de dispositivos y equipos con diferentes interfaces inalámbricas que permitan la interconexión y la interoperabilidad de los dispositivos y equipos. Esto ha hecho que cada vez sea más complejo el acceso a las redes inalámbricas especialmente en escenarios interiores, ocasionando inconvenientes en su operación, por lo cual es necesario realizar estudios para su correcta planificación, diseño, despliegue y operación teniendo en cuenta los fenómenos y factores que se encuentran incursos en estos procesos, con el fin de lograr un correcto funcionamiento de las redes y brindar a los usuarios servicios con calidad.

En este capítulo se analiza de manera general las redes inalámbricas y se estudian algunos factores, efectos y fenómenos que afectan la propagación de las ondas electromagnéticas.

1.2 EVOLUCIÓN DE LAS REDES INALÁMBRICAS

El origen de las WLAN se fundamenta en los resultados de un experimento realizado en 1979 por F.R. Gfeller y U. Bapst ingenieros de IBM en Suiza, quienes diseñaron e implementaron una red local inalámbrica con dispositivos infrarrojos dentro de una fabrica [4]. Estos resultados, publicados en el volumen 67 de los *Proceeding* del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), se consideran como inicio en la línea



CAPITULO 1

evolutiva de esta tecnología. Las investigaciones fueron realizadas no solo con infrarrojos sino también con microondas [5] a nivel de laboratorio.

En Norteamérica en la Universidad de Hawái, Norman Abramson profesor de Ingeniería trabajó en la implementación de una red inalámbrica a principios de los años setenta denominada ALOHA, red basada en *Packet Radio* un sistema consistente en el envío vía radio de señales digitales en pequeños paquetes que son reensamblados en el receptor que comunicaba el computador central y los computadores de la Universidad ubicados en las islas hawaianas.

En mayo de 1985 después de más de cuatro años de estudios, la Comisión Federal de Comunicaciones⁴ (FCC, *Federal Communications Commission*), asignó las bandas de frecuencias para aplicaciones Industriales, Científicas y Medicas⁵ (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*) 902 MHz – 928 MHz, 2.400 GHz – 2.4835 GHz y 5.725 GHz – 5.850 GHz a las redes inalámbricas, lo que permitió que el desarrollo de estas redes no solo fuera mediante experimentos a nivel de laboratorio sino también a nivel comercial [6].

A partir de ese momento el enfoque de los trabajos realizados cambió, enfatizándose en el desarrollo durante cinco años. A finales de la década de los noventa se publicaron varias investigaciones referentes a WLAN operativas que superaban la velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps, velocidad mínima establecida por el IEEE 802⁶ para que la red sea realmente considerada una Red de Área Local (LAN, *Local Area Network*).

Sin embargo a pesar del progreso que generaron estas publicaciones, la aceptación en el mercado era demasiado baja por diferentes razones tales como:

- Variedad de técnicas, tecnologías y normas existentes, debido al desarrollo de soluciones particulares de cada fabricante, presentándose incompatibilidad entre estas, al utilizar frecuencias y tecnologías muy distintas, por tanto no existía una norma o estándar de referencia.
- Elevados precios de los dispositivos, que reflejaban el alto costo de investigación en soluciones tecnológicas propietarias.

⁴ Agencia Federal del Gobierno de Estados Unidos encargada de regular y administrar en materia de telecomunicaciones.

⁵ Bandas de radiofrecuencia electromagnética reservadas internacionalmente para uso en áreas industriales, científicas y medicas.

⁶ Estudio de estándares elaborados por IEEE sobre de Redes de Área Local y Redes de Área Metropolitana.



CAPITULO 1

- Uso limitado de la red inalámbrica al solo permitir el soporte de datos comparado con las redes cableadas donde se podía llevar multitud de aplicaciones tanto de voz, datos y vídeo.

Es 1990 se formó el comité IEEE 802.11⁷, el cual inicio trabajos para generar una norma para las WLAN cuyo primer borrador fue publicado en 1994 y su primera norma en junio de 1997.

Así mismo, el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*), a través del comité ETSI-RES 10, inició en 1991 procesos para crear una norma para WLAN a la que denominó HiperLAN⁸ (*High Performance Local Area Network*) asignando las bandas de frecuencias 5.2GHz y 17.1 GHz.

En 1993 se constituyó la Asociación de Datos por Infrarrojos (IrDA, *Infrared Data Association*), con el objeto de promover el desarrollo de las WLAN basadas en enlaces por infrarrojo.

En 1996, un grupo de empresas del sector de informática móvil, formaron el Foro de Interoperabilidad de Redes de Área Local Inalámbrica (WLI, *Wireless Local Area Network Interoperability Forum*), con el objeto de potenciar este mercado mediante la creación de un amplio portafolio de productos y servicios interoperables, que incrementaron el uso de dispositivos portables con interfaces inalámbricas.

En 1999 Nokia, 3com, Airones, Intersil, Lucent Technologies y Symbol deciden asociarse como la Alianza de Compatibilidad Ethernet Inalámbrica (WECA, *Wireless Ethernet Compability Alliance*). Desde el 2003 el nombre de esta asociación es *Wi-Fi Alliance* y ahora está constituida por más de 150 empresas.

La Wí-Fi Alliance se encarga de adoptar, probar y certificar que los equipos cumplan con los estándares establecidos con el objeto de crear una certificación que fomente la tecnología inalámbrica y que asegure la compatibilidad entre equipos.

⁷ Estándar de IEEE que define claramente las especificaciones de los dos niveles más bajos del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*).

⁸ Estándar europeo para anchos de banda inalámbricos LAN que opera con un rango de datos de 54Mbps.



CAPITULO 1

El mercado de las telecomunicaciones inalámbricas se ha incrementado en los últimos años, debido a distintas razones tales como:

- La finalización del estándar IEEE 802.11, que introduce factores positivos tales como:
 - Interoperabilidad: El desarrollo de los fabricantes se fundamenta en lo establecido en el estándar, permitiendo la implementación de soluciones basadas en equipos y dispositivos de diferentes fabricantes que pueden trabajar conjuntamente.
 - Costos: Evidentemente, se produjo también una notable reducción en los precios de este tipo de productos. Una vez establecido el estándar son más los fabricantes que desarrollan sus propias soluciones inalámbricas y además porque esto supone un empuje definitivo para el mercado masivo de componentes produciendo el abaratamiento de los mismos.
- Alta utilización de *laptops* y Asistentes Personales Digitales (PDA, *Personal Digital Assistant*), y en general de sistemas y equipos de informática portables, que hacen posible que sus usuarios puedan estar en continuo movimiento, al tiempo que están en contacto con los servidores y con otros computadores de la red, es decir, la WLAN permite simultáneamente movilidad y acceso a la red.

1.3 TIPOS DE REDES INALÁMBRICAS

1.3.1 Redes de Área Amplia (WAN)

Las Redes de Área Amplia (WAN, *Wide Area Network*) son redes utilizadas para interconectar dispositivos, redes públicas o privadas que se encuentran alejadas grandes extensiones geográficas como países o continentes, transportando un alto volumen de información proveniente de diferentes nodos [7].

La interconexión de dos o más regiones se puede hacer mediante el uso de cable telefónico, enlaces vía radio microondas o satelitales, siendo los enlaces inalámbricos los más utilizados por los diferentes proveedores u operadores por su bajo costo de implementación, flexibilidad y fácil instalación.



CAPITULO 1

En general las WAN son usadas por organizaciones que buscan conectar sus LANs que se encuentran separadas físicamente en diferentes edificaciones, ciudades o países, considerándose así redes de tipo privadas que manejan un gran ancho de banda, con dispositivos de altas prestaciones y velocidades de transmisión de datos inferiores a las brindadas por una LAN.

1.3.2 Redes de Área Local Inalámbrica (WLAN).

Son las redes inalámbricas comúnmente más utilizadas que operan en regiones pequeñas las cuales interconectan nodos con el fin de compartir inalámbricamente recursos y servicios a un grupo de usuarios.

Las WLAN son utilizadas por diferentes instituciones, empresas, universidades y otras organizaciones, para compartir archivos, impresoras y otros recursos entre un grupo de usuarios organizados estratégicamente por intereses en común con el fin de optimizar las prestaciones de la red.

La conexión a la red se establece vía radio utilizando dispositivos inalámbricos de acceso como enrutadores o puntos de acceso y tarjetas inalámbricas utilizadas en los diferentes terminales de los usuarios como laptops, computadoras de escritorios o dispositivos de mano.

La mayoría de las WLAN operan siguiendo los estándares de IEEE 802.11, alcanzando velocidades de transmisión de datos entre 11 Mbps y 54 Mbps y un rango de cobertura entre 30 m y 150 m [4].

Las WLAN brindan muchas ventajas sobre las redes cableadas convencionales tales como movilidad, flexibilidad, velocidad de transmisión de datos, escalabilidad, fácil instalación y bajo costo de implementación, lo cual ha permitido la utilización de WLAN en estructuras que por su arquitectura u otros factores no ha sido posible implementar una red cableada.

1.3.3 Redes de Área Personal (PAN)

Una Red de Área Personal (PAN, *Personal Area Network*) se define para un alcance reducido de máximo 30m, donde se interconectan dispositivos electrónicos como PC con periféricos o accesorios, teléfonos móviles y cámaras.

La tecnología utilizada es Bluetooth, operando en la banda de frecuencias de 2.4 GHz, transfiriendo información de video, voz y datos a una velocidad máxima de transmisión de datos de hasta 1 Mbps [7].



CAPITULO 1

La Figura 1.1 muestra en resumen la clasificación de redes inalámbricas.

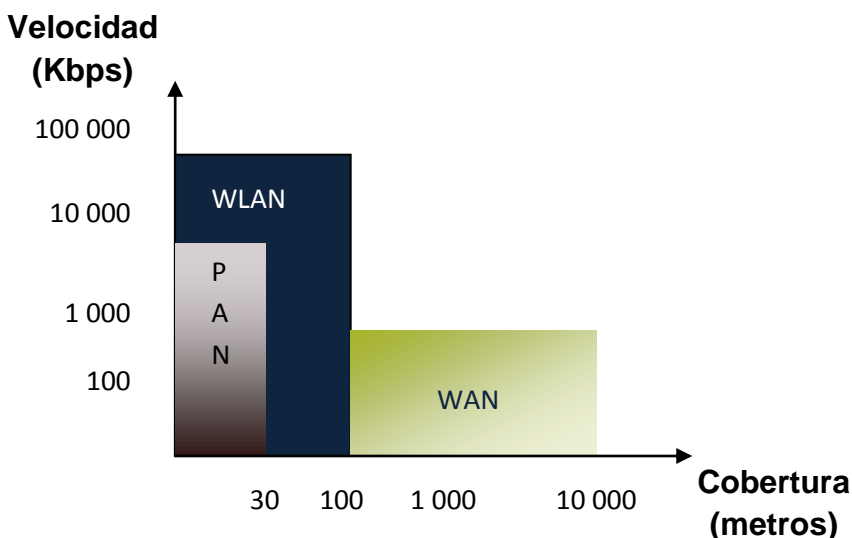


Figura 1.1 Clasificación de las redes inalámbricas

1.4 NORMATIVIDAD DE REDES INALÁMBRICAS

La normatividad de las redes inalámbricas es regida por IEEE, asociación mundial sin ánimo de lucro dedicada a la estandarización, que promueve el desarrollo y la innovación en las tecnologías de la información y la electrónica, y las ciencias en general para beneficio de la humanidad, la cual ha definido los siguientes estándares referentes a las redes Inalámbricas.

1.4.1 IEEE 802.11a

Estándar creado en 1997 y conocido como WiFi5 debido a que establece como banda de frecuencia de operación 5 GHz. Este estándar brinda una velocidad máxima de transmisión de datos de 2 Mbps y su principal ventaja es que es un sistema que presenta poca interferencia debido a la baja utilización de otros sistemas que operan en esta misma banda de frecuencias [7].

En 1999 esta norma fue ratificada, y aumentó la velocidad de transmisión de datos a 54 Mbps, con la utilización de 52 subportadoras que utilizan la técnica de transmisión basada en Multiplexación por División en Frecuencias Ortogonales⁹ (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

⁹ Técnica de transmisión digital en la cual se divide el espectro disponible en varios subcanales que se traslapan, cada uno centrado en una portadora y que debido a la ortogonalidad no presentan interferencia entre sí.



CAPITULO 1

También presenta algunas desventajas, como el limitado alcance de cobertura por la frecuencia utilizada lo que incrementa las pérdidas de propagación y las perdidas por absorción de materiales, estas últimas debido a la menor longitud de onda, lo que restringe su uso a equipos y dispositivos en LOS, siendo necesario la instalación de un mayor número de APs 802.11a para cubrir la misma zona.

1.4.2 IEEE 802.11b

Estándar creado en abril de 2000, su banda de frecuencias de operación es 2.4 GHz, alcanza una velocidad máxima de transmisión de datos de 11 Mbps y define como protocolo de control Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones¹⁰ (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access, Collision Avoidance*). La utilización de la banda de frecuencias de 2.4 GHz permite un mayor alcance de cobertura y un menor número de AP para cubrir la misma zona [4]. Este estándar utiliza la Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*) y Modulación por Desplazamiento de Fase Binario (BPSK, *Binary Phase Shift Keying*) para las velocidades de transmisión de datos más bajas y Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*) combinada con la Modulación por Código Complementario (CCK, *Complementary Code Keying*) para velocidades de transmisión de datos más elevadas.

IEEE 802.11b es uno de los estándares más acogidos internacionalmente o de mayor popularidad, debido a esto utilizar este estándar también tiene sus desventajas, dado que la banda de 2.4 GHz es de un amplio uso comercial en teléfonos inalámbricos, dispositivos Bluetooth y hornos de microondas, lo que en algunos casos ocasiona una alta interferencia.

1.4.3 IEEE 802.11g

Estándar creado en junio de 2003, su banda de frecuencia de operación es de 2.4 GHz y alcanza una velocidad máxima de transmisión de datos de 54 Mbps utilizando la técnica de transmisión basada en OFDM, siendo compatible con dispositivos que operen bajo el estándar IEEE 802.11b debido a la utilización de la misma banda de frecuencia de operación. La interoperabilidad de los dos estándares extiende el uso de las redes *Wi-Fi*, a una gran variedad de

¹⁰ Protocolo de control que permite la múltiple operación de estaciones en un mismo medio de transmisión, permitiendo que las estaciones solo transmitan cuando el canal se encuentre libre y espera un reconocimiento por parte del receptor de que la información ha sido entregada correctamente.



CAPITULO 1

aplicaciones para redes públicas, empresariales y hogares que demandan servicios que requieren velocidades de transmisión de datos más altas, tales como la transmisión de audio y video.

Aunque la combinación de dispositivos que obedecen a uno u otro estándar es posible, la utilización de nodos bajo el estándar IEEE 802.11b en una red que opere con el estándar IEEE802.11g, reduce la velocidad de transmisión de 54 Mbps a 11 Mbps.

1.4.4 IEEE 802.11n

Estándar ratificado en septiembre de 2009, el cual especifica dos bandas de frecuencias 2.4 GHz o 5 GHz, permitiendo la interoperabilidad con todos los dispositivos basados en los anteriores estándares establecidos por IEEE. El sistema hace uso de la tecnología Múltiples Entradas Múltiples Salidas¹¹ (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*) aumentando la eficiencia espectral del sistema tomando ventaja de la diversidad espacial [8].

Este estándar alcanza velocidades de transmisión de datos por encima de 100 Mbps y distancias de hasta 500 m, además de una baja interferencia al usar la banda de 5 GHz. En la Tabla 1.1 se resumen las características mencionadas anteriormente para cada estándar de IEEE 802.11.

Tabla 1.1 Comparación entre las tecnologías WLAN

CARACTERISTICA	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n
Banda de frecuencia de operación	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz – 5 GHz
Máxima velocidad de transmisión de datos	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	>100 Mbps
Rango	100 m	20 m	50 m	500 m
Alcance	Medio	Bajo	Medio	Alto
Modulación	CCK	OFDM	CCK,OFDM	CCK,OFDM

¹¹ Tecnología que mediante el empleo de varias antenas, permite resolver información coherentemente desde varias rutas de señales mediante antenas receptoras separadas espacialmente.



1.5 PRINCIPIOS DE PROPAGACIÓN

En los sistemas de comunicaciones las señales se transmiten a través de ondas electromagnéticas, siendo el medio de propagación la atmósfera terrestre, por lo que se hace crítico el estudio del comportamiento de estas ondas y los fenómenos que las afectan cuando viajan de un punto transmisor o fuente a otro receptor o destino. Dichas ondas se propagan mediante las oscilaciones del campo eléctrico y magnético y se comportan según las ecuaciones de Maxwell, una serie de ecuaciones que describen por completo la teoría electromagnética con las cuales se puede obtener una predicción teórica de la magnitud de las ondas electromagnéticas en el tiempo [9].

Los sistemas inalámbricos en especial las redes WLAN operan tanto en escenarios de exteriores como en escenarios de interiores, en donde el canal radio se caracteriza por presentar una alta complejidad y aleatoriedad, por lo que es indispensable contar con información detallada y un elevado conocimiento sobre las características del escenario para la correcta planificación, despliegue y desempeño de estas redes.

Con el fin de caracterizar de una manera precisa el comportamiento de señales radioeléctricas en escenarios de interiores, haciendo uso de las ecuaciones de Maxwell, es necesario conocer exactamente las características del escenario tales como la posición, la forma, las propiedades eléctricas y la composición de todos los objetos que se encuentran en el área de estudio en todo instante de tiempo [9], sin embargo, este proceso se torna demasiado complejo, tedioso y poco práctico. Por lo tanto, se hace necesario utilizar nuevos métodos que describan de una manera precisa y eficiente el comportamiento del escenario sobre la señal radioeléctrica.

En el estudio de las comunicaciones inalámbricas en escenarios de interiores, se han identificado una serie de fenómenos físicos que afectan la propagación de las señales radioeléctricas y por lo tanto, el nivel de potencia recibido por un terminal receptor y calidad de la señal.

Para lograr una mejor comprensión de estos fenómenos, es necesario identificar el comportamiento y los principios de los mismos, estudiando sus características físicas de una manera simplificada mediante una caracterización independiente con respecto a los otros fenómenos. En primera instancia, se identifican tres efectos principales que afectan la calidad de la señal recibida en un terminal receptor [10]:



CAPITULO 1

- Pérdidas de propagación.
- Pérdidas por configuración del terreno.
- Pérdidas por efecto multitrayectoria.

1.5.1 Pérdidas de Propagación

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunications Union*), define la propagación en el espacio libre como la propagación de una onda electromagnética en un medio dieléctrico ideal homogéneo, que se puede considerar infinito en todas direcciones [11]. En el espacio libre la relación entre las potencias transmitidas y recibidas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, ya que al propagarse la onda electromagnética, esta se aleja del transmisor y se esparce sobre una superficie cada vez mayor. La disminución de potencia ocasionada por este fenómeno es conocida como pérdida de espacio libre y es en realidad una dispersión de la potencia a medida que se aleja del transmisor. Por medio de las ecuaciones de Maxwell se puede predecir la potencia recibida en el espacio libre tal como aparece en la ecuación 1.1.

$$l_0 = \left[\frac{4\pi d}{\lambda} \right]^2 \quad (1.1)$$

Donde:

- d : Distancia en metros desde el transmisor al punto de medida.
- λ : Longitud de onda de la señal en metros.

Al expresar la longitud de onda de la ecuación 1.1 en términos de la frecuencia de operación y la velocidad de propagación de una onda electromagnética (aproximadamente la velocidad de la luz) se obtiene la ecuación 1.2.

$$l_0 = \left[\frac{4\pi dc}{f} \right]^2 \quad (1.2)$$

Expresando la ecuación 1.2 en términos logarítmicos, se obtiene la ecuación 1.3.

$$10\log \left[\frac{4\pi dc}{f} \right]^2 \quad (1.3)$$



CAPITULO 1

Finalmente, la ecuación 1.3 se puede representar tal como aparece en la ecuación (1.4) la cual se denomina Formula de Friis para pérdidas de espacio libre.

$$L_0 = 32.45 + 20\log[d] + 20\log[f] \quad (1.4)$$

Donde:

- d : Distancia en kilómetros desde el transmisor al punto de medida.
- f : Frecuencia de operación en megahertz (MHz).

La ecuación 1.4 determina la atenuación que sufre la señal de una onda radioeléctrica con una frecuencia de trabajo f sobre un espacio libre (sin presencia de obstáculos) y radiada desde una antena transmisora, separada una distancia d de la antena receptora, las cuales son consideradas antenas isotrópicas¹².

A manera de ejemplo, se realiza el cálculo de las pérdidas de espacio libre para una WLAN IEEE 802.11b, que trabaja en el canal 7, que es el canal central de la banda de frecuencias de 2.4 GHz, y cuya frecuencia central es igual a 2.442 GHz. Considerando el terminal receptor a una distancia de 100 metros del terminal transmisor se tiene:

$$L_0 = 32.45 + 20\log[0.1] + 20\log[2.442] = 80.205 \text{ dB}$$

Con base en el anterior resultado, se estima que para el canal 7 de un sistema WLAN 802.11b existen unas pérdidas de propagación de espacio libre de 80.205 dB a una distancia de 100 m del transmisor.

Es importante resaltar que las condiciones de propagación de las ondas electromagnéticas en espacio libre son ideales, ya que se asume como área de estudio una región donde no existe ningún obstáculo, por lo que prevalece la condición de Línea de Vista¹³ (LOS, *Line of Sight*). Además el espacio se mantiene constante y se considera infinito. En la práctica esto no es válido ya que deben considerarse una serie de obstáculos y fenómenos que afectan la propagación y el comportamiento de las señales.

Las ondas electromagnéticas al propagarse en las condiciones de espacio libre mencionadas, no presentan ningún tipo de pérdidas de energía, sin embargo para el caso de estudio de las WLAN, se debe considerar que estas señales se

¹² La antena isotrópica es un modelo hipotético de antena sin pérdidas, la cual posee una característica de radiación uniforme en todas direcciones.

¹³ Línea de vista es un término utilizado en radiocomunicaciones para referirse a un enlace de radio con visibilidad directa o sin obstrucciones físicas entre las antenas.



CAPITULO 1

propagan a través de la atmósfera terrestre, la cual contiene partículas que pueden absorber la energía electromagnética ocasionando que la señal sufra una reducción en la potencia a medida de se aleja de la fuente de radiación. Además, las WLAN que operan en escenarios de interiores presentan una multitud de obstáculos que pueden llegar a afectar el comportamiento de la señal, por lo que no es posible considerar válida la aproximación de espacio libre, debido a que en este tipo de escenarios existen otros factores que afectan considerablemente la calidad de la señal radioeléctrica.

Conocer estos fenómenos y sus principios es fundamental para caracterizar de manera más precisa el canal y sus condiciones implícitas con el fin de garantizar una cobertura eficaz de la zona deseada.

1.5.2 Pérdidas por Configuración del Terreno

En las comunicaciones inalámbricas es necesario tener en cuenta las interacciones de la señal radioeléctrica con objetos de características diferentes que se encuentran en el entorno de la zona de interés o escenario de despliegue. Es importante conocer y entender este tipo de fenómenos o interacciones, los cuales se mencionan a continuación.

→ Absorción: cuando una onda radioeléctrica se topa con un obstáculo en su trayecto, al atravesarlo, parte de su energía es absorbida por este objeto y se convierte en otro tipo de energía, obteniendo del otro lado del obstáculo una señal atenuada¹⁴ la cual continua propagándose.

La absorción de la energía por el medio de transmisión, está en función de las propiedades del medio que atraviesa la onda electromagnética y a su frecuencia de operación. En la Tabla 1.2 se muestran los niveles de atenuación que producen algunos materiales.

¹⁴ La atenuación es la reducción del nivel de la señal, o pérdida de potencia cuando la onda electromagnética transita por cualquier medio de transmisión y se calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$\alpha[dB] = 10 \log \left[\frac{P1}{P2} \right]$$

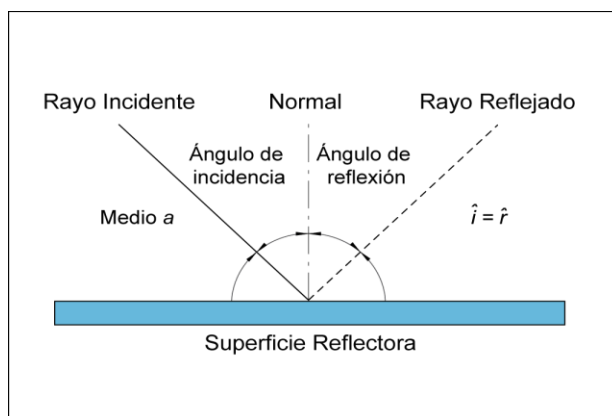
Donde $P1$ es la intensidad de potencia a la entrada del obstáculo y $P2$ es la intensidad de potencia a la salida del obstáculo.

Tabla 1.2 Absorción de materiales

Material	Atenuación (dB)
Espacio abierto	0
Ventana (tintado no metálico)	3
Ventana (tintado metálico)	5-8
Muros finos	5-8
Muros medios de madera	10
Muros gruesos	15-20
Muros muy gruesos	20-25
Suelo / Techo grueso	15-20
Suelo / Techo muy grueso	20-25

→ Reflexión: cuando una onda radioeléctrica choca con una barrera existente, parte o la totalidad de la potencia incidente¹⁵ no logra penetrar dicha barrera, ocasionando una disminución en la intensidad de potencia al mismo tiempo que la onda es reflejada con un ángulo similar al que esta incidió sobre la superficie, debido a que el medio se mantiene invariante, tal y como se muestra en la Figura 1.2.

Este fenómeno depende de las propiedades de la señal radioeléctrica y las propiedades físicas de la barrera u obstáculo. Las propiedades de la señal son la longitud de onda y el ángulo de incidencia del rayo¹⁶. Las propiedades físicas de la barrera son la geometría de la superficie, la textura y el material que la compone.

**Figura 1.2** Reflexión de ondas sobre una superficie reflectora.

¹⁵ La incidencia de una señal radioeléctrica es el impacto de la señal sobre una superficie, objeto u obstáculo.

¹⁶ Un rayo es una línea que representa la dirección de la propagación de la onda electromagnética.

CAPITULO 1

- Difracción: cuando una onda radioeléctrica se encuentra obstruida por una superficie con irregularidades agudas de dimensiones comparables con la longitud de onda, se genera en dicho punto nuevas fuentes secundarias de onda, denominadas ondas difractadas, como se muestra en la Figura 1.3.

La difracción se encuentra ligada con la distorsión¹⁷ de la señal y aumenta dependiendo de qué tan agudo sea el pico del objeto que obstruye la onda, y de las dimensiones de este con relación a la longitud de onda de la señal.

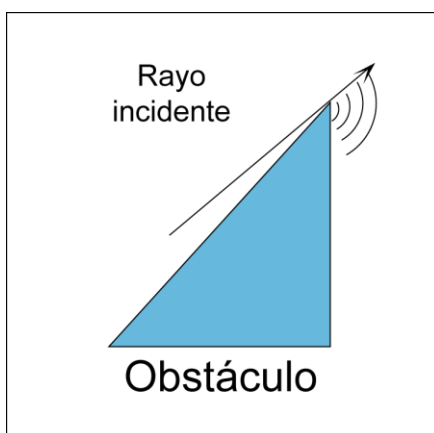


Figura 1.3 Difracción de ondas electromagnéticas

- Dispersión: cuando una señal radioeléctrica viaja a través de un considerable número de obstáculos, de pequeñas dimensiones en comparación con la longitud de onda de la señal, la señal se propaga en múltiples direcciones y por lo tanto su energía se divide como se muestra en la Figura 1.4.

Este fenómeno de interacción se produce por irregularidades en el área, rugosidades en la superficie o simplemente por pequeños objetos que se encuentran en el camino de las ondas radioeléctricas y provocan que su energía sea radiada en diferentes direcciones.

¹⁷ La distorsión es la pérdida de energía que sufren las amplitudes de los diferentes armónicos de la señal transportada, en donde dichas pérdidas no son proporcionales, generando una deformación desigual de los diferentes armónicos de la señal radioeléctrica al pasar por un medio de transmisión.

CAPITULO 1

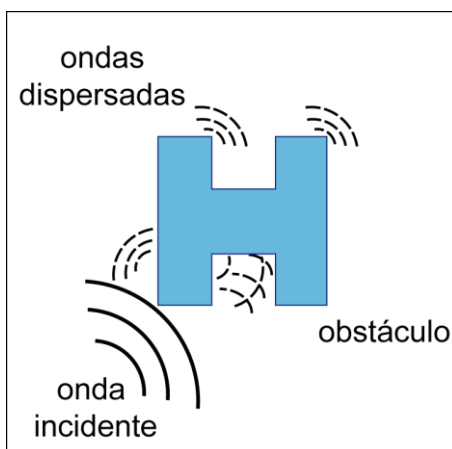


Figura 1.4 Dispersión de ondas electromagnéticas

→ Refracción: cuando una onda radioeléctrica pasa de un medio a otro de diferente densidad, el frente de onda¹⁸ presenta una desviación en su dirección, como se muestra en la Figura 1.5.

La refracción depende del ángulo de incidencia de la onda electromagnética con la superficie del nuevo medio y de la permitividad¹⁹ de los medios. En las redes WLAN este fenómeno no es muy significativo.

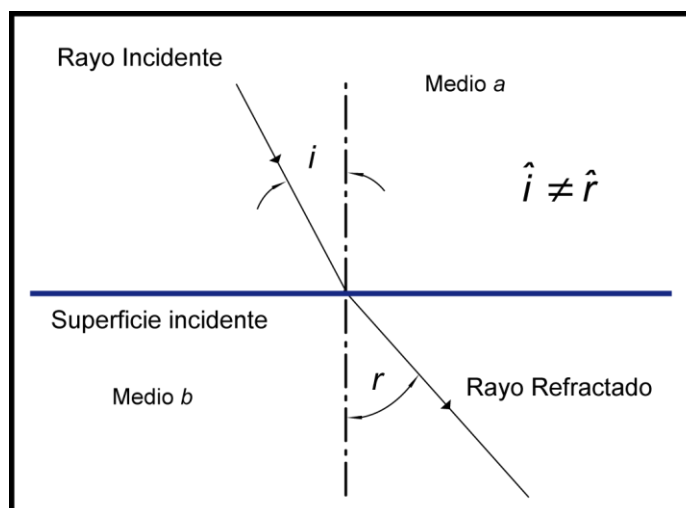


Figura 1.5 Refracción de ondas electromagnéticas

¹⁸ El frente de onda representa un conjunto de puntos del medio que son alcanzados por la onda radioeléctrica con la misma fase, en el mismo instante de tiempo.

¹⁹ La permitividad es un número adimensional característico de cada material que determina el grado de susceptibilidad que tiene un material en presencia de un campo eléctrico.



CAPITULO 1

En general, los escenarios de interiores presentan una condición de No Línea de Vista (NLOS, *Not Line of Sight*), en la que se acentúan los fenómenos de reflexión, difracción y dispersión. La pérdida de potencia que experimenta la señal debido a obstáculos en su recorrido se denomina desvanecimiento lento o por sombra [10] [13].

Además, en la propagación de las señales radioeléctricas en escenarios de interiores, las distancias son cortas y se presenta una gran cantidad de obstáculos, los cuales generan caminos adicionales a los caminos principales que toma la señal radioeléctrica en su recorrido, a través de los cuales viajan múltiples versiones o ecos de la señal radioeléctrica, con diferencias en amplitud y fase²⁰. Este fenómeno es conocido como multitrayectoria y se caracteriza por generar retardos y autointerferencias²¹ en la señal [13].

1.5.3 Pérdidas por Efecto Multitrayectoria

Cuando existen múltiples caminos en la propagación de la señal radioeléctrica, el nivel de potencia recibido en un determinado instante de tiempo y lugar, es la suma de todas las contribuciones de energía de las señales recibidas desde cualquier dirección [9], lo que ocasiona distorsión en la señal, tal y como se muestra en la Figura 1.6. La superposición²² de múltiples señales en un punto provenientes desde diferentes direcciones produce efectos tanto positivos, como negativos. Uno de los principales efectos negativos que se busca contrarrestar en las transmisiones inalámbricas es la interferencia en la señal recibida por el terminal receptor.

En la propagación multitrayectoria, el nivel de señal medido en términos de intensidad de campo o de potencia recibida varía en el tiempo y en el espacio. Lo cual influye en gran medida en la calidad del servicio en comunicaciones inalámbricas.

²⁰ Dos ondas están en fase cuando los valles y crestas de ambas coinciden.

²¹ Interferencia es el proceso que altera, modifica o destruye la señal radioeléctrica en el canal existente entre el terminal transmisor y el terminal receptor, las cuales pueden ser de dos tipos, Interferencia constructiva y destructiva. La interferencia constructiva es producida cuando dos o más ondas electromagnéticas con la misma frecuencia que encuentran en un mismo punto en fase dando como resultado el aumento de amplitud de la señal recibida. De manera análoga, la interferencia destructiva es producida cuando dos señales con la misma frecuencia se encuentran en un punto con una diferencia de fase creando un nuevo patrón de ondas de menor intensidad que cualquiera de las componentes.

²² El principio de superposición establece que cuando varias ondas electromagnéticas se combinan en un punto, la magnitud en cualquier punto del medio en el que interactúan, es la suma algebraica de los desplazamientos en ese mismo punto de todas las ondas presentes.

1.6 DESVANECIMIENTO

El desvanecimiento es un fenómeno espacial que depende de la existencia y desplazamiento de objetos en el entorno de propagación y describe las fluctuaciones de las amplitudes de las señales radioeléctricas en periodos de tiempo o distancias de propagación. El desvanecimiento se relaciona con la disminución de la potencia recibida con relación a su valor esperado, de tal forma que los efectos de pérdidas a pequeña escala pueden ser ignorados [13].

Dependiendo de los efectos de propagación manifestados en el canal, como la duración, la profundidad y la velocidad de cambio de la atenuación de la señal, se puede presentar dos tipos de desvanecimientos [13]:

- Desvanecimiento lento: producido por los obstáculos inherentes al canal radio. Por lo general, el desvanecimiento lento se debe a grandes obstáculos que se interponen entre la visión directa del transmisor y receptor. Estos obstáculos provocan un efecto que permanece por más tiempo que las atenuaciones por el efecto multitrayectoria [10].
- Desvanecimiento rápido: se encuentra estrechamente relacionado a la variación de los retardos de la propagación de las diferentes señales que llegan a alcanzar al receptor por caminos distintos con diferentes fases, las cuales pueden generar interferencia constructiva y destructiva. Para el caso de interferencia destructiva, se considera que la propagación multitrayectoria da a lugar al desvanecimiento rápido [12].

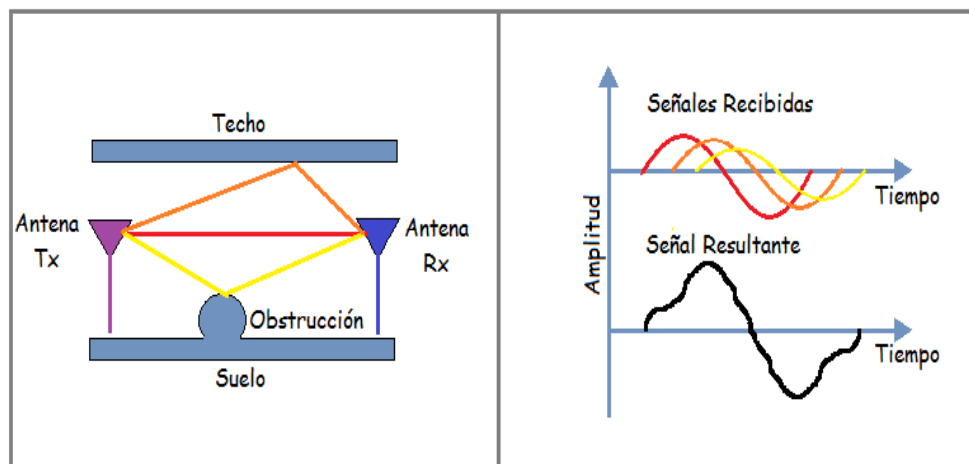


Figura 1.6 Desvanecimiento rápido



1.7 DISPERSIÓN DE RETARDO

La Dispersión de Retardo (DS, *Delay Spread*), es una medida estadística de los retardos de tiempo entre los diferentes caminos tomados por la señal. Este fenómeno llega a afectar la señal incluso sin haber ruido presente en el canal, debido a que puede generar errores de detección, ya que las señales asociadas a un bit/símbolo previo pueden interferir con las señales asociadas al siguiente bit/símbolo. La dispersión de retardo introduce una dispersión temporal sobre la señal transmitida [10].

El fenómeno de interferencia de símbolos adyacentes recibe el nombre de interferencia intersímbolos²³ (ISI, *Inter Symbol Interference*), siendo más crítico cuando más alta es la velocidad de transmisión de datos o *throughput*²⁴ del sistema [13].

²³ La Interferencia Intersímbolo se produce por la superposición de todas las señales que llegan a la antena receptora, las cuales al estar desfasadas entre sí, afecta la capacidad del receptor para diferenciar un símbolo real de los símbolos adyacentes. Esta clase de interferencia se presenta en las comunicaciones digitales [14].

²⁴ El throughput es la capacidad de información que se puede transmitir a través en un canal por unidad de tiempo.



2

TÉCNICA DE TRAZADO DE RAYOS Y MODELOS DE PROPAGACIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

La caracterización y el modelado del canal radioeléctrico son una de las partes más complejas en el diseño de sistemas inalámbricos para la comunicación de datos, por lo que se han convertido en una de las áreas de investigación más importantes y fundamentales en estudios de cobertura²⁵ de sistemas inalámbricos [15]. Con el fin de obtener un modelo²⁶ que logre predecir con precisión el comportamiento de una señal radioeléctrica a través del canal de propagación, es necesario entender los factores que afectan la propagación radioeléctrica.

El estudio de estos factores ha generado una serie de métodos que permiten predecir la cobertura de un sistema radioeléctrico basándose en diversos modelos físico-matemáticos. Tradicionalmente la mayoría de los modelos utilizados son estadísticos o empíricos, los cuales están basados en estudios prácticos de una serie de características generales descriptivas del medio de propagación en función de la frecuencia de operación, las alturas de las antenas de transmisión y recepción, potencias de transmisión, ganancia de las antenas, entre otros. Lo que los hace validos solo en condiciones específicas, limitando su campo de acción.

Hoy en día los modelos determinísticos son los más utilizados en el estudio de la cobertura de los sistemas inalámbricos ya que estos proporcionan mayor precisión en su predicción comparados con los modelos empíricos, además los modelos determinísticos presentan mayor flexibilidad para evaluar diferentes posiciones o tipos de antenas y brindan la posibilidad de evaluar estadísticamente los desvanecimientos [12]. Aunque esta clase de modelos resultan ser más complejos, el uso de herramientas informáticas facilita el procesamiento de la información que estos modelos manejan.

²⁵ Se denomina cobertura a la zona en la que el terminal receptor recibe una señal con un nivel tal que permite ofrecer al usuario el servicio de voz o datos.

²⁶ Un modelo científico es una representación abstracta de un fenómeno, un sistema real, un proceso o una teoría con la que se busca aumentar su comprensión, hacer predicciones o predecir el comportamiento del fenómeno [16].



CAPITULO 2

Dependiendo del fenómeno que se quiera analizar, la propagación de la energía electromagnética se puede estudiar desde tres puntos diferentes: el geométrico, el ondulatorio y el cuántico. Si la energía no interacciona con la materia, entonces obedece a un conjunto de leyes geométricas.

En este capítulo se estudia la técnica de trazado de rayos y se provee una visión general de los distintos modelos de la propagación en escenarios de interiores.

2.2 TRAZADO DE RAYOS

La técnica de Trazado de Rayos (RT, *Ray Tracing*), basado en la Óptica Geométrica (GO, *Geometrical Optics*) y en la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD, *Uniform Theory of Diffraction*) es una técnica aplicada en la informática gráfica para la representación de imágenes reales. En la actualidad, es utilizada como modelo determinístico en el estudio de la propagación de las señales radioeléctricas para predecir la respuesta del canal radioeléctrico en escenarios de interiores y exteriores [15].

Teniendo en cuenta que la propagación de la energía radiada presenta leyes geométricas independiente de la longitud de onda o intensidad. La técnica de trazado de rayos considera cada uno de los posibles caminos que puede tomar la señal radioeléctrica desde el transmisor hasta el receptor mediante una distribución espacial uniforme de un número finito de rayos²⁷ con los que se busca modelar la propagación de los distintos frentes de ondas, así como su interacción con el canal radioeléctrico. Cada uno de los rayos puede sufrir una serie de fenómenos, los cuales se obtienen mediante leyes físicas de la reflexión, refracción y difracción, donde se tiene en cuenta la contribución de cada rayo en el terminal receptor [15].

En los modelos que usan trazado de rayos, por lo general se puede especificar el número máximo de reflexiones y difracciones que se tendrán en cuenta, además de las características de los obstáculos y barreras en el canal de propagación de la señal radioeléctrica. Los algoritmos de trazado de rayos más complejos incluyen mecanismos de dispersión difusa y penetración a través de diversos materiales con lo que se genera una predicción muy completa de las pérdidas de propagación y la dispersión en el tiempo de la señal [17], haciendo que este método de predicción sea ideal para trabajar especialmente en escenarios de interiores, en donde los niveles de la señal varían en mayor medida de un punto

²⁷ Un rayo en la óptica geométrica es considerado como una línea en el espacio que corresponde a una dirección del flujo de la energía radiante en su propagación.



CAPITULO 2

específico en el canal de propagación a otro como consecuencia de un número mucho mayor de componentes reflejados o multitrayecto ocasionados por obstáculos en el trayecto de la señal, mientras que en entornos urbanos o de exteriores, la propagación de las señales se ve influenciada por condiciones atmosféricas a elevadas frecuencias de operación, del orden de los 10 GHz [6] [15].

El inconveniente de los modelos de trazado de rayos radica en la necesidad de caracterizar de manera detallada el entorno a analizar, lo que hace que la precisión del modelo dependa en gran medida de la exactitud y veracidad de los datos asociados al entorno de simulación, además del modelo de propagación, número de reflexiones, difracciones y número de puntos a analizar, afectando directamente el tiempo de procesamiento [6].

Aunque no se ha logrado explotar toda la capacidad de esta técnica, ya que en general es considerado excesivamente arduo y poco práctico al precisar una gran cantidad de tiempo de procesamiento, el avance de la tecnología y la llegada de nuevos equipos de cómputo con mayor capacidad y velocidad de procesamiento, así como la necesidad de realizar predicciones de cobertura más precisas en sus resultados, han ocasionado que las empresas desarrolladoras de herramientas software de simulación para el análisis y diseño de sistemas de comunicación inalámbricas, se enfoquen en la creación de múltiples herramientas basadas en la técnica de trazado de rayos con el fin de predecir de manera eficiente la cobertura de un sistema inalámbrico.

El objetivo de la técnica de trazado de rayos en la predicción de la cobertura de un sistema inalámbrico, es simular las posibles trayectorias e identificar o tener en cuenta las contribuciones de la señal que alcanzan el terminal receptor con el fin de evaluar el valor de campo eléctrico en una zona de interés o un punto específico del escenario de despliegue. Para lo anterior existen dos métodos o procedimientos de trazar rayos, los cuales se describen a continuación.

2.2.1 Óptica Geométrica

El origen de la óptica geométrica se remonta al estudio de la propagación de la luz, donde se asume que a frecuencias suficientemente altas los frentes de ondas pueden ser tratados como rayos, logrando desprestigiar la naturaleza ondulatoria de los campos electromagnéticos para hacer un estudio no de luz en sí, sino de su propagación como energía radiante por medio de la teoría de rayos. En la óptica



CAPITULO 2

geométrica solo se tienen en cuenta los rayos directos, reflejados dispersados y refractados, no así los difractados [18].

La óptica geométrica asume que las dimensiones físicas de los objetos con los cuales el rayo interactúa son grandes en comparación a la longitud de onda de la energía radiante. El objetivo de la óptica geométrica es determinar todas las posibles rutas que seguirá dicha energía al propagarse a través de distintos medios, superficies u obstáculos que presenta el canal de transmisión hasta llegar a su destino, pero sin entrar en las bases de su interacción con el mismo [18] [19].

En la figura 2.1 se muestra los frentes de onda correspondientes a los rayos para los casos de ondas que se propagan por ondas esféricas a partir de una fuente puntual, y planas a partir de una fuente localizada en el infinito.

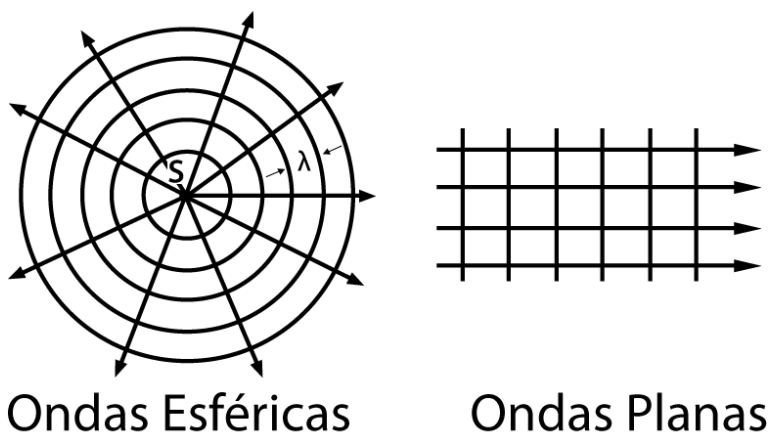


Figura 2.1 Rayos correspondientes a ondas esféricas y ondas planas

Con la aplicación de la óptica geométrica en el cálculo de la cobertura radioeléctrica se pueden determinar las contribuciones de los campos electromagnéticos de las ondas incidentes, reflejadas y refractadas en el punto de recepción, al mismo tiempo que analiza las pérdidas debido a la distancia o a la incidencia sobre obstáculos de una forma más sencilla que utilizando las ecuaciones de Maxwell. Además, se puede estimar la propagación de las ondas radioeléctricas mediante un número discreto de rayos y una serie de características de propagación sobre ellos. En general la óptica geométrica estudia 3 tipos de rayos:

- Rayo directo.
- Rayo reflejado.
- Rayo refractado.



CAPITULO 2

2.2.1.1 Campo Eléctrico de un Rayo Directo

Los medios de propagación homogéneos se encuentran caracterizados por un índice de refracción constante, y el camino que siguen los rayos de las ondas radioeléctricas propagadas entre 2 puntos siempre es en línea recta, por lo que el frente de onda no interactúa con ningún obstáculo en su camino desde el terminal transmisor hasta el terminal receptor y no se genera ninguna atenuación adicional a la de la propagación por línea de vista [15]. Para la condición de rayo directo, se puede predecir el valor de campo electromagnético mediante la ecuación 2.1, la cual representa el campo de una onda esférica que se atenúa con la distancia.

$$E_d(r_d) = E_0 \frac{e^{-jkr_d}}{r_d} \quad (2.1)$$

Donde:

- E_0 : Valor de campo eléctrico respecto a una distancia unitaria o básica.
- r_d : Distancia entre la antena transmisora y receptora.
- k : Número de onda $\frac{2\pi}{\lambda}$ representa el número de longitudes de onda en la distancia 2π .

Cuando un rayo incide sobre una superficie de separación entre dos medios diferentes, parte de su energía es reflejada y parte es refractada. La cantidad que caracteriza cuanta intensidad es reflejada y cuanta es refractada viene dada por los coeficientes de reflexión y transmisión, los cuales dependen en magnitud de las características eléctricas de los medios y la polarización²⁸ del rayo incidente. El coeficiente de reflexión es mayor para la polarización perpendicular al plano de incidencia que para la polarización paralela al mismo, mientras que el coeficiente de transmisión es mayor para la polarización paralela al plano de incidencia que para la polarización perpendicular al mismo [19].

- ✓ Polarización vertical TM: Una onda electromagnética tiene polarización vertical cuando el campo eléctrico de esta se propaga en dirección perpendicular a la superficie de la tierra. Los coeficientes de reflexión y transmisión de potencia para una polarización vertical vienen dados por las ecuaciones 2.2 y 2.3 respectivamente.

²⁸ La polarización se define como la orientación del campo eléctrico de una onda electromagnética respecto a la superficie de la tierra, si su orientación permanece constante se dice que su polarización es lineal y puede ser de tipo horizontal o vertical. Si el vector de polarización gira a medida que la onda recorre una longitud de onda por el espacio y su intensidad de campo es igual en todas direcciones se dice que la onda posee polarización circular, por el contrario si su intensidad varía se dice que esta tiene una polarización elíptica.

CAPITULO 2

$$R_{TM} = \left[\frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[\frac{n_t \cos \theta_t - n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_t + n_i \cos \theta_i} \right]^2 \quad (2.2)$$

$$T_{TM} = 1 - R_{TM} \quad (2.3)$$

- ✓ Polarización horizontal TE: Una onda electromagnética tiene polarización horizontal cuando el campo eléctrico de esta se propaga en dirección paralela a la superficie de la tierra, El coeficiente de reflexión y transmisión para una polarización horizontal viene dado por las ecuaciones 2.4 y 2.5 respectivamente.

$$R_{TE} = \left[\frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[\frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \right]^2 \quad (2.4)$$

$$T_{TE} = 1 - R_{TE} \quad (2.5)$$

La dirección de propagación es siempre perpendicular a los vectores de campo eléctrico y magnético, por lo que uno de esos vectores debe estar en el plano de incidencia. En la figura 2.2 se muestra los cambios de polarización que experimenta una onda incidente al reflejarse y refractarse.

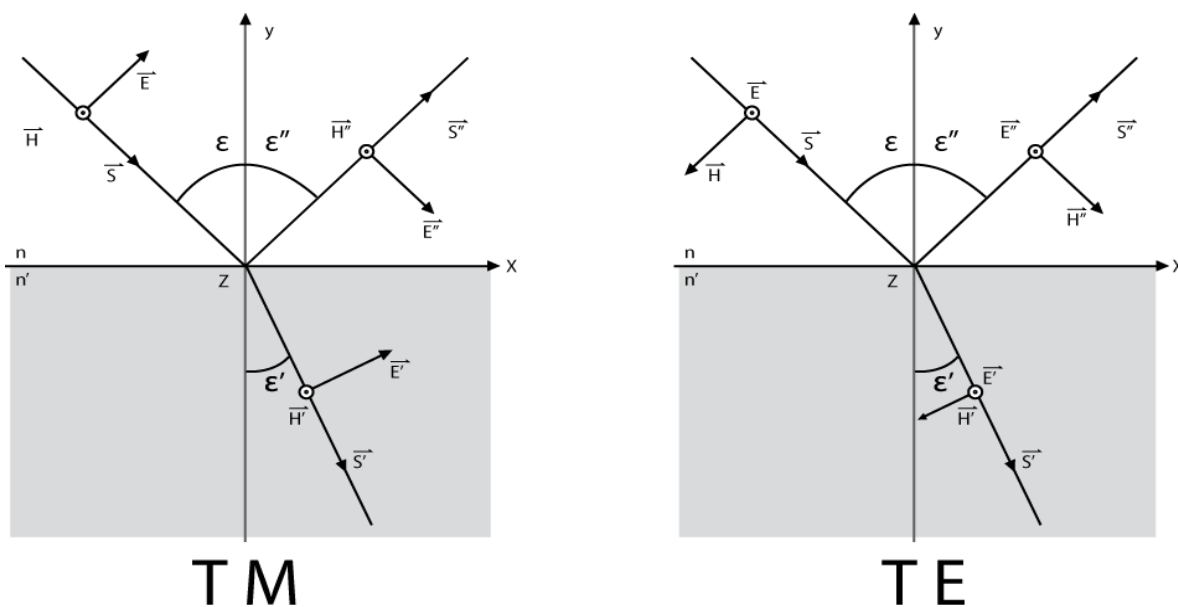


Figura 2.2 Representación de rayos reflejados y refractados sobre el plano de incidencia con polarización TM y TE respectivamente

2.2.1.2 Campo Eléctrico de un Rayo Reflejado

Como se estudió en el capítulo anterior, la reflexión se produce cuando una onda incide sobre una superficie con propiedades electromagnéticas diferentes al canal de propagación. Dicho fenómeno se clasifica en dos tipos: especular, cuando dicha superficie es lisa; y difusa, cuando la superficie es rugosa [20]. En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo gráfico de reflexión especular y reflexión difusa.

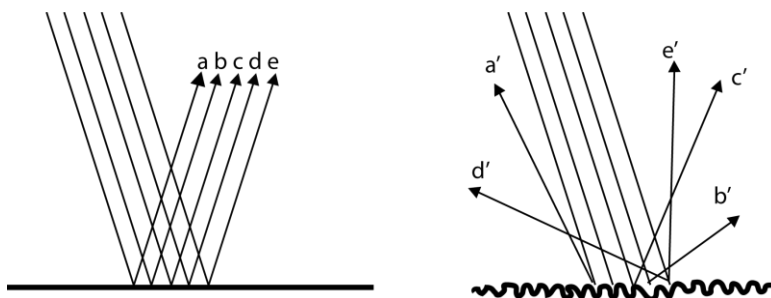


Figura 2.3 Reflexión especular y reflexión difusa

Basándose en las leyes de Snell para la reflexión [19], la óptica geométrica permite el cálculo de los campos cuando el rayo se encuentra con un obstáculo en el análisis de la propagación por el canal. La ley de Snell para la reflexión, relaciona dos rayos, el rayo incidente y el rayo reflejado, los cuales se encuentran en el mismo plano y presentan ángulos iguales en magnitud²⁹ [20]. Para la condición de rayo reflejado, se puede predecir el campo electromagnético mediante la ecuación 2.6.

$$E_R(r) = E_0 R \frac{e^{-jk_r}}{r} \quad (2.6)$$

Donde:

- E_0 : Valor de campo eléctrico respecto a una distancia unitaria o básica.
- r : Distancia total recorrida por el rayo reflejado.
- R : Coeficiente de reflexión (depende de la polarización del campo incidente, horizontal o vertical).
- k : Número de onda $\frac{2\pi}{\lambda}$ representa el número de longitudes de onda en la distancia 2π .

²⁹ Los ángulos de incidencia y de reflexión, se miden respecto a la normal del plano en el punto de incidencia del rayo con el mismo.



CAPITULO 2

En caso de producirse múltiples reflexiones para un mismo rayo, el valor de R viene dado por la productoria de cada valor R_i correspondiente a la reflexión i tal como se expresa en la ecuación 2.7.

$$R = \prod_i R_i \quad (2.7)$$

2.2.1.2 Campo Eléctrico de un Rayo Refractado

En ambientes de interiores, el espesor de una pared típica es aproximadamente de 20 cm, lo que ocasiona que el rayo traspase la pared casi sin presentar ningún efecto en su dirección. Como consecuencia puede tomarse como válida la teoría de Snell, para los casos en que la señal radioeléctrica atraviese una pared considerando nulo el grosor de esta. En este caso se puede asumir que el ángulo de incidencia y el ángulo de transmisión son iguales respecto a la superficie de incidencia. Según las anteriores consideraciones, para la condición de rayo refractado, se puede predecir el campo electromagnético mediante la ecuación 2.8.

$$E_T(r) = E_0 T \frac{e^{-jk_r}}{r} \quad (2.8)$$

Donde:

- E_0 : Valor de campo eléctrico respecto a una distancia unitaria o básica.
- r : Distancia total recorrida por el rayo al atravesar el obstáculo.
- T : Coeficiente de transmisión (depende de la polarización del campo incidente, horizontal o vertical).
- k : Número de onda $\frac{2\pi}{\lambda}$ representa el número de longitudes de onda en la distancia 2π .

En caso de producirse múltiples refracciones para un mismo rayo, el valor de T viene dado por la productoria de cada valor T_i correspondiente a la refracción i tal como se expresa en la ecuación 2.9.

$$T = \prod_i T_i \quad (2.9)$$

Cuando se presenta polarización circular o elíptica, basta con descomponer el campo incidente en sus componentes horizontal y vertical, con el fin de utilizar los coeficientes definidos para cada una de estas polarizaciones y sumarlos vectorialmente.



CAPITULO 2

2.2.2 Teoría Uniforme de la Difracción

La difracción de un rayo es la redistribución de la energía dentro de un frente de onda al interactuar con un objeto de tamaño menor a la longitud de onda de la energía radiante, el cual actúa como un foco emisor secundario. Debido al tamaño de los objetos que producen este fenómeno, su efecto constituye un importante mecanismo de propagación electromagnética especialmente en regiones donde se presentan zonas de sombra, ya que este fenómeno permite que las ondas se propaguen alrededor del obstáculo [21].

Debido a que en el fenómeno de difracción, el rayo suele interactuar con objetos de dimensiones físicas pequeñas, la óptica geométrica no considera el cálculo de los campos producidos por la difracción. Para estos casos en particular, el trazado de rayos se sustenta en teorías diferentes a la de óptica geométrica para modelar el comportamiento de una onda electromagnética en obstáculos [22].

La Teoría Geométrica de la Difracción (GTD, *Geometric Theory of Diffraction*), es una extensión de la teoría óptica geométrica, la cual permite predecir el campo eléctrico en una región de sombra, sin embargo esta no puede aplicarse en la vecindad de las fronteras de transición, ya que la GTD suele presentar inconsistencias en estas zonas. La solución a este problema se encuentra en la UTD que se deriva de la denominada GTD en donde se utiliza un modelo para la difracción el cual depende únicamente de la geometría del objeto, amplitud, fase y polarización de la onda incidente en el punto de difracción de manera similar a lo que sucede con el fenómeno de reflexión, superando singularidades presentadas a lo largo de las fronteras de transición. UTD soluciona la singularidad de los campos entre las zonas de transición logrando un modelo más exacto de la realidad física del fenómeno [21].

2.2.2.1 Fronteras de Transición

Las fronteras de transición dividen el espacio bidimensional en tres regiones cuyas fronteras dependen de la posición del terminal transmisor, el terminal receptor y de la posición del obstáculo tal como se observa en la Figura 2.4.

A la frontera comprendida entre las regiones I y II se les conoce como fronteras de sombra reflejada (RSB, *Reflected Shadow Boundary*;) y a la frontera comprendida por las regiones II y III como frontera de sombra incidente (ISB, *Incident Shadow Boundary*). En la Tabla 2.1 se muestran las contribuciones a considerar en el

estudio de la interacción de la onda radioeléctrica con un objeto sobre las regiones de transición [21].

Tabla 2.1 Contribuciones asociadas a cada una de las regiones de transición

	Región I	Región II	Región III
Separación Angular	$0 < \phi < \pi - \phi'$	$\pi - \phi' < \phi < \pi + \phi'$	$\pi + \phi' < \phi < n\pi$
Contribuciones	Directo Reflejado	Directo Difractado	Difractado

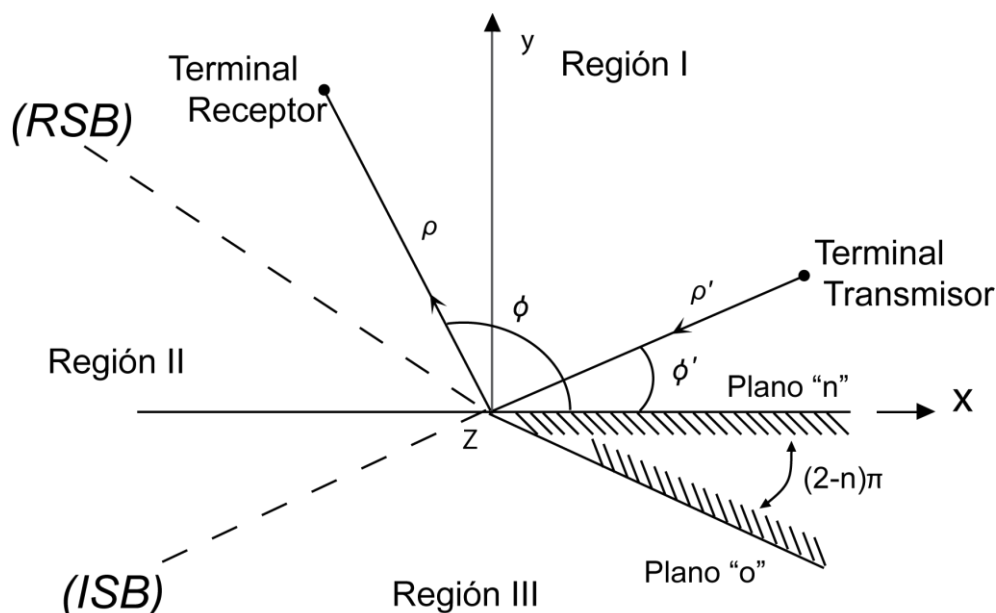


Figura 2.4 Fronteras de transición

2.2.2.2 Campo Eléctrico de un Rayo Difractado

En la Figura 2.5 se observa la difracción producida por la interacción de la señal con la esquina de un obstáculo agudo con un ángulo de $(2-n)\pi$ [23].

El campo eléctrico generado por un rayo difractado, viene dado por la ecuación 2.10.

$$E_d = \frac{E_0}{S} DA(S; S') e^{-jk(S+S')} \quad (2.10)$$



CAPITULO 2

Donde:

- E_0 : Valor de campo eléctrico respecto a una distancia unitaria o básica.
- D : Coeficiente de difracción.
- $S; S'$: distancias entre la fuente, y el punto de difracción y desde el punto de difracción hasta el punto de observación respectivamente.
- $A(S; S')$: *Spreading factor*, término que tiene en cuenta la atenuación de la intensidad de campo con la distancia.

$\frac{1}{\sqrt{S'}}$	Para una onda difractada plana.
$\frac{1}{\sqrt{S' \sin \beta_0}}$	Para una onda difractada cilíndrica.
$\sqrt{\frac{S'}{S'(S+S')}}}$	Para una onda difractada esférica.

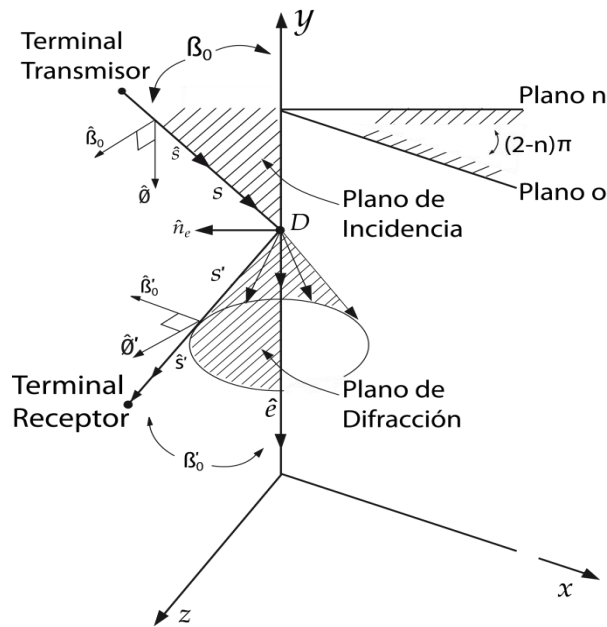


Figura 2.5 Difracción producida por la incidencia oblicua de un rayo con el borde de un obstáculo

- β_0 : Ángulo entre el rayo incidente y el obstáculo.
- ϕ : Ángulo entre el plano de incidencia y el plano 0.
- ϕ' : Ángulo entre el plano de difracción y el plano 0.
- D : Punto de difracción.



CAPITULO 2

El coeficiente de difracción, sin tener en cuenta la polarización de la onda está dado por la ecuación 2.11.

$$D = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2nk} \sin \beta_0} \left\{ \begin{array}{l} \cot \left[\frac{\pi + (\varnothing' - \varnothing)}{2n} \right] F[kLa^+(\varnothing' - \varnothing)] + \cot \left[\frac{\pi - (\varnothing' - \varnothing)}{2n} \right] F[kLa^-(\varnothing' - \varnothing)] + \\ R_0 \cot \left[\frac{\pi - (\varnothing' + \varnothing)}{2n} \right] F[kLa^-(\varnothing' + \varnothing)] + R_n \cot \left[\frac{\pi + (\varnothing' + \varnothing)}{2n} \right] F[kLa^+(\varnothing' + \varnothing)] \end{array} \right\} \quad (2.11)$$

Donde:

- F : Función de Transición: $F(x) = 2j\sqrt{x}e^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-j\tau^2} d\tau$
- $a^{\pm}(\varnothing' \pm \varnothing) = 2\cos^2 \left[\frac{2n\pi N^{\pm} - (\varnothing' \pm \varnothing)}{2} \right]$: Separación angular entre el punto de observación y la RSB o la ISB; y N^{\pm} es una Integral cuya aproximación satisface la ecuación: $2n\pi N^{\pm} - (\varnothing' \pm \varnothing) = \pm\pi$
- k : Longitud de onda.
- L : parámetro de distancia que depende de la forma de la onda incidente.

$$L = S' \sin^2 \beta_0 \quad \text{Para una onda incidente plana.}$$

$$L = \frac{\varnothing * \varnothing'}{\varnothing + \varnothing'} \quad \text{Para una onda incidente cilíndrica.}$$

$$L = \frac{S * S'}{S + S'} \sin^2 \beta_0 \quad \text{Para una onda incidente esférica.}$$

- $R_0; R_n$: Coeficientes de reflexión relacionados al plano 0 con un ángulo de incidencia \varnothing y al plano n con un ángulo de reflexión $n\pi - \varnothing$, respectivamente.

El campo eléctrico total que llega al terminal receptor es la contribución de cada uno de los rayos, los cuales dependen de los diferentes caminos que toma la señal, de los cambios de dirección en su recorrido y los fenómenos que se presentan en su trayectoria.

Una vez estimadas individualmente todas las contribuciones de los caminos que siguen los rayos, el campo eléctrico total se puede calcular por medio de la



CAPITULO 2

ecuación 2.12. Y a su vez, se puede calcular la potencia total recibida en el terminal receptor por medio de la ecuación 2.13.

$$E_T = \sum_{l=1}^L E_l \quad (2.12)$$

$$P_R = \frac{|E_T|^2}{120\pi} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \quad (2.13)$$

Donde:

- E_l : Campo eléctrico de cada una de las contribuciones.
- $|E_T|$: Módulo del campo eléctrico total.
- G_r : Ganancia de la antena receptora.

De esta manera el trazado de rayos estima la cobertura de la señal radioeléctrica calculando el campo eléctrico en un punto del canal de propagación en escenarios de interiores.

2.3 MÉTODOS BASADOS EN TEORÍA DE RAYOS

Los métodos basados en teoría de rayos, se sustentan en modelos determinísticos cuasi-ópticos que analizan la influencia del terreno a través de mecanismos de reflexión, refracción, difracción y dispersión [12]. El conocimiento de la trayectoria de un rayo es fundamental en el estudio de la propagación de las señales radioeléctricas usando estos métodos.

Los métodos basados en la teoría de rayos, permiten calcular fenómenos tales como dispersión de retardo, desvanecimiento, respuesta al impulso, perdidas de trayecto, nivel de señal recibida y rangos de cobertura, entre otros [13] [24]. El modelo básico es el trazado de rayos, del cual hace uso la herramienta de predicción de cobertura Wireless InSite® con la cual se desarrolla este trabajo de grado.

2.3.1 Métodos de Predicción de Trazado de Rayos

El trazado de rayos se aplica en modelos en 2D y en 3D. Para los modelos en 2D, únicamente se trazan rayos en un plano, por lo que no todos los caminos hacia el terminal receptor son considerados, lo que ocasiona una reducción del tiempo de procesamiento. Generalmente los modelos en 2D son utilizados para la estimación de la cobertura en escenarios de interiores amplios y complejos.



CAPITULO 2

Además de trabajar en 2D, el trazado de rayos tiene la capacidad de trabajar en 3D, en donde se trazan todos los rayos que alcanzan al terminal receptor incluidas las reflexiones presentadas en techos y pisos, lo que requiere de un tiempo de procesamiento mucho mayor que en el trazado de rayos en 2D.

Las técnicas de trazado de rayos implementados en la herramienta Wireless InSite® combinan algoritmos de trazado de rayos con UTD. El trazado de rayos determina los caminos de propagación de la señal radioeléctrica para cada punto receptor, mientras que UTD evalúa el campo eléctrico asociado a cada trayectoria del rayo [25].

En esta sección se estudian los métodos más utilizados en la técnica de trazado de rayos.

2.3.1.1 Método de Disparo y Rebote de Rayos

El método de Disparo y Rebote de Rayos (SBR, *Shooting-and-Bouncing Ray*) consiste en lanzar una serie finita de rayos con una separación angular constante desde la antena transmisora, trazando el rayo con el fin de detectar si este incide sobre algún objeto o es recibido por la antena receptora, si el rayo incide sobre un objeto, se produce reflexión, refracción dispersión o difracción, dependiendo de las propiedades geométricas del objeto. Cuando el rayo alcanza el terminal receptor, el campo eléctrico asociado a dicho rayo es calculado según el modelo de propagación implementado, tal y como se muestra en la Figura 2.6 [26].

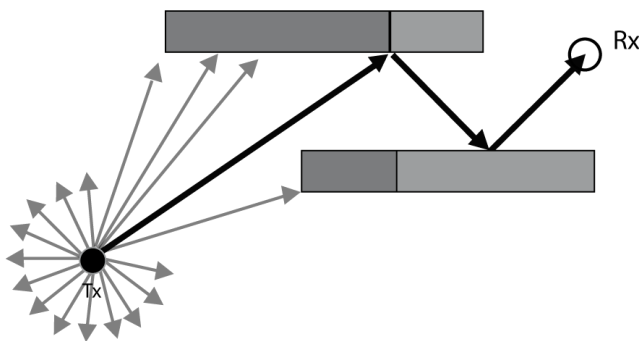


Figura 2.6 Representación gráfica del método de disparo y rebote de rayos

2.3.1.2 Método de Lanzado de Rayos

El método de lanzado de rayos o de fuerza bruta consiste en lanzar uniformemente en distintas direcciones y con una separación angular constante, un número finito de rayos desde el terminal transmisor, cubriendo el ángulo



CAPITULO 2

solido³⁰ por completo considerando las múltiples reflexiones y refracciones que pueda sufrir cada rayo lanzado hasta alcanzar al receptor.

El número de reflexiones y refracciones a considerar se basa en el nivel de señal debajo del cual se pueda llegar a despreciar una contribución de la señal. El método de lanzado de rayos es muy útil en escenarios complejos, como los escenarios de interiores debido a que permite un fácil seguimiento de las reflexiones, pero en la localización de los terminales receptores resulta complejo ya que existe una gran dificultad para determinar si un rayo alcanza o no un objeto puntual, debido a que el número de rayos lanzados es finito [27].

Las contribuciones que alcanzan el terminal receptor, se determinan con esferas en el caso de trabajar en un plano tridimensional o círculos en un plano bidimensional llamados radios de impacto, las cuales rodean las zonas incidentes de cada rayo, el cual se considera que incide sobre el terminal receptor únicamente si la trayectoria del rayo intercepta la esfera correspondiente a dicho terminal [21].

2.3.1.3 Método de Imágenes

El método de imágenes consiste en analizar objetos de gran tamaño, los cuales se encuentran próximos al terminal receptor. Por lo general estos objetos suelen ser las paredes, el piso y el techo de los escenarios, utiliza el concepto de fuentes virtuales, llamadas imágenes, el cual representa un sistema equivalente del rayo reflejado tal y como se muestra en la Figura 2.7.

Este modelo genera imágenes de todas las fuentes en todos los planos o respecto de todos los planos que pudiera tener el sistema obteniendo de esta forma N imágenes de primer orden, en la cual no se utiliza el terminal transmisor, sino una imagen de orden inmediatamente anterior. Cabe resaltar que este concepto puede ser aplicado en reflexiones de orden superior, en el cual, para el caso de N planos y una única fuente transmisora, se obtendría $N(N-1)$ planos de orden superior.

Una vez el rayo ha sido descrito mediante las múltiples reflexiones que sufre, la atenuación asociada a la trayectoria del rayo se puede calcular fácilmente sobre el plano de orden que alcanza al terminal receptor, teniendo en cuenta que la

³⁰ El ángulo solido, es el ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado, que se corresponde con la zona del espacio limitada por una superficie cónica; el ángulo solido se calcula con el fin de medir el tamaño aparente de dicho objeto.

CAPITULO 2

cantidad de energía reflejada en los planos de orden inferior depende de los parámetros del medio sobre el que incide la señal radioeléctrica [21].

El método de imágenes se considera eficiente, pero su aplicación depende de la simplicidad del escenario de estudio.

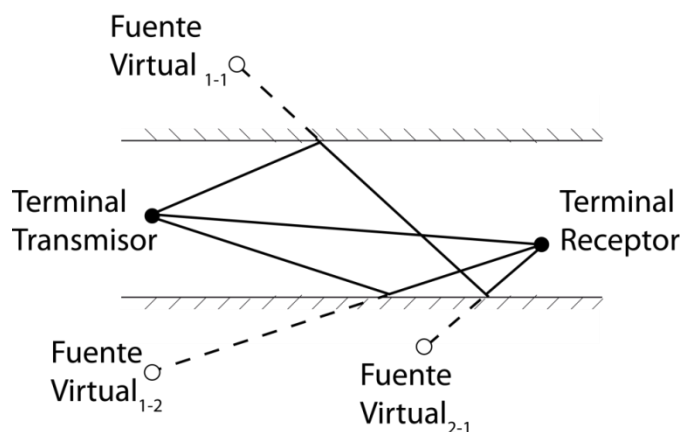


Figura 2.7 Representación gráfica del método de imágenes

Una vez estudiado los fenómenos presentes en la propagación de escenarios de interiores y la caracterización de los mismos usando el trazado de rayos, se está en capacidad de abordar la problemática de predicción de propagación de un sistema inalámbrico en torno al análisis de la zona de cobertura.

2.4 MODELOS DE PROPAGACIÓN

La manera en que las señales radioeléctricas se propagan puede variar según el escenario de implementación del sistema inalámbrico. En escenarios de interiores por lo general la propagación de las señales resulta un fenómeno muy complejo de estudiar, debido a la gran cantidad de objetos y mecanismos que intervienen en la propagación siendo imposible cuantificar el efecto de cada uno de ellos, por lo tanto haciendo uso de modelos de propagación se busca estimar la cobertura y los valores de potencia o campo eléctrico recibido que permite el dimensionamiento adecuado de los sistemas de comunicación inalámbricos [28].

Los modelos de propagación son aproximaciones realizadas considerando los efectos que presentan los diferentes obstáculos dentro de un escenario en el cálculo de cobertura de un sistema radioeléctrico. Estos modelos tienen como finalidad estimar la potencia de la señal recibida a una determinada distancia y determinar variaciones de potencia en el terminal receptor de acuerdo al efecto del medio de propagación sobre las señales radiadas para determinar en qué medida



CAPITULO 2

afecta el medio de propagación la señal radioeléctrica [28] [24]. Dependiendo del tipo de sistema de comunicación que se desee analizar, algunos parámetros toman mayor o menor importancia, por lo que diversos modelos han sido desarrollados con el fin de estimar con mayor facilidad los parámetros pertinentes [13].

Inicialmente, los primeros modelos de propagación eran usados en la predicción de cobertura en áreas rurales extensas y grandes zonas de cobertura. De esta época vienen los ábacos de Bullington y las primeras curvas de propagación propuestas por el Comité Constitutivo Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR, *International Radio Consultative Committee*), ahora conocido como el sector de Radiocomunicaciones de la ITU (ITU-R). Dichas familias de curvas proporcionan la intensidad de campo para un valor de potencia radiada aparente normalizado en función de la altura efectiva de las antenas y la distancia entre el terminal transmisor y el terminal receptor [28].

Con la llegada de los computadores, se automatizaron los procedimientos desplazando los métodos manuales, por los métodos computacionales, los cuales se basan en programas informáticos que hacían uso de datos extraídos de perfiles del terreno mediante la consulta de mapas cartográficos que estimaban la propagación, mediante un parámetro de ondulación del terreno. Actualmente los modelos de propagación se presentan como herramientas informáticas, a las cuales se les puede incorporar Mapas Digitales de Terreno (DTM, *Digital Terrain Maps*) [12].

En general, los modelos de propagación pueden clasificarse en tres grandes grupos:

- Estadísticos.
- Empíricos.
- Determinísticos.

2.4.1 Modelos Estadísticos

Los modelos estadísticos se caracterizan por no requerir información precisa respecto a la geometría y las características eléctricas del terreno, ya que no intentan explicar el comportamiento físico del canal, sino caracterizar estadísticamente la potencia recibida mediante funciones de densidad de probabilidad y distribución acumulativa [28].



CAPITULO 2

Estos modelos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas radioeléctricas. Con el fin de obtener resultados con un grado aceptable de precisión, es necesario realizar múltiples consideraciones dependiendo del escenario de estudio; fenómenos como la reflexión, refracción, difracción, dispersión, entre otros, son útiles como base para la formulación, descripción y análisis de estos modelos [13].

2.4.2 Modelos Empíricos

Los modelos empíricos se caracterizan por calcular las pérdidas entre el terminal transmisor y el terminal receptor mediante el uso de información espacial del escenario en estudio y parámetros como la frecuencia, potencias de transmisión y altura efectiva de las antenas. Estos modelos se basan en mediciones realizadas en un escenario típico con el fin de proporcionar una estimación rápida de las pérdidas básicas, la intensidad de campo efectivo o el valor de potencia en cualquier punto alrededor de un terminal transmisor.

El uso de los modelos empíricos es sencillo, ya que estos modelos se traducen en procedimientos matemáticos simples de implementar, son ideales cuando el escenario presenta muchas irregularidades y resulta muy difícil el modelado de los obstáculos. Su principal desventaja radica en que tienen en cuenta de manera implícita las influencias del escenario, por lo tanto, su precisión puede no ser muy buena ya que esta depende de las características del escenario típico y la similitud con el escenario a analizar [29].

2.4.3 Modelos Determinísticos

A diferencia de los modelos estadísticos y empíricos, los cuales se basan en mediciones de la señal radioeléctrica recibida, los modelos determinísticos estiman a partir de las ecuaciones de Maxwell el comportamiento físico de las ondas radioeléctricas determinando el comportamiento del campo eléctrico [28].

En la actualidad, los modelos determinísticos son los que mejor describen el comportamiento de las señales; estos modelos vienen en herramientas software, las cuales exigen una gran capacidad de procesamiento computacional. Al estimar con mayor fidelidad los fenómenos de las señales radioeléctricas que los modelos descritos anteriormente, se obtiene un alto grado de precisión en la predicción de la cobertura. El principal inconveniente de los modelos determinísticos radica en el alto costo computacional y el gran volumen de la base de datos, la cual debe contener información muy detallada del escenario (distribución espacial) [13].



CAPITULO 2

A continuación hace un análisis de los modelos de propagación implícitos en la herramienta Wireless InSite® que utilizan trazado de rayos.

2.5 MODELOS DE PROPAGACIÓN UTILIZADOS POR LA HERRAMIENTA WIRELESS INSITE®

2.5.1 Modelo de Espacio Libre

Este es el modelo básico de la propagación no guiada aplicado a cualquier sistema radioeléctrico en el cual se determina que existe un camino con características idénticas a las del vacío a través del canal en el que se propaga una onda. El modelo se basa en que el campo eléctrico es inversamente proporcional a la distancia medida en cualquier punto tomando como origen la fuente de transmisión e incluye la ganancia de la antena transmisora.

Este modelo no considera las pérdidas asociadas a los fenómenos de difracción, refracción y reflexión, ni características del terreno y obstrucciones del entorno, por tal razón los resultados obtenidos a partir de este modelo están bastante lejos de cálculos reales, son cálculos ideales que no se presentan en la realidad pero que si ayudan a determinar las mínimas pérdidas que existen en la propagación. En la Tabla 2.2 se presentan los parámetros utilizados por este modelo.

Tabla 2.2 Parámetros modelo de espacio libre

Máximas reflexiones	No aplica
Máximas difracciones	No aplica
Ambiente	Todos
Terreno	Todos
Alcance	Sin limite
Altura de las antenas	Todas
Tipo de antenas	Todos
Trazado de rayos	Un solo rayo del Transmisor al Receptor
Frecuencia mínima	Depende de la aplicación
Frecuencia máxima	Depende de la aplicación



CAPITULO 2

El modelo solo determina un único rayo que se propaga desde el transmisor hasta el receptor, donde solo se establece la distancia, tiempo de llegada, potencia de recepción y las pérdidas básicas de propagación.

2.5.2 Modelo de Cañón Urbano

Modelo utilizado en entornos urbanos con edificaciones de gran altitud como se muestra en la Figura 2.8, en donde las antenas de transmisión y recepción se encuentran ubicadas muy próximas al suelo en comparación con la altura de los edificios presentándose un efecto de guía de onda. Este modelo tiene en consideración los rayos difractados en las esquinas de los edificios hasta con tres difracciones, siendo necesario para un resultado preciso el análisis de solo dos difracciones. Por otra parte, se desprecia la energía difractada en los tejados de los edificios.

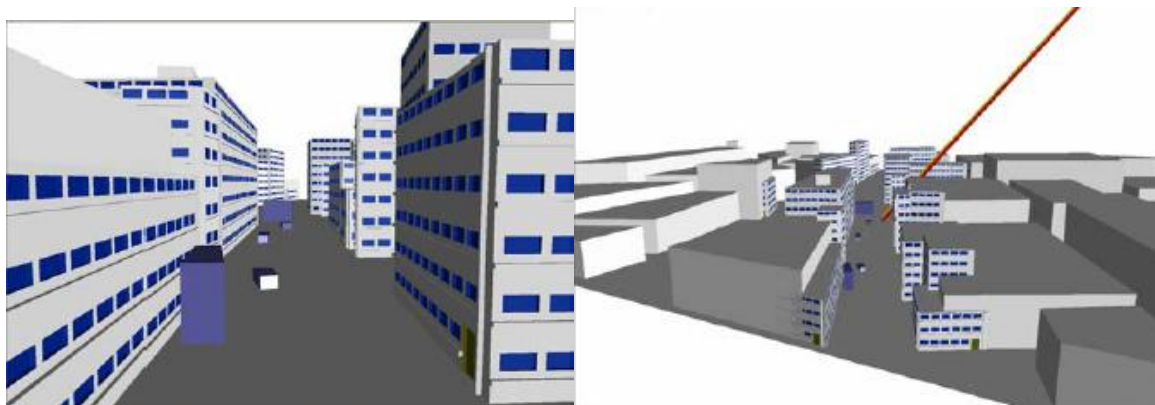


Figura 2.8 Escenario urbano

A este modelo se le aplica el método de trazado de rayos SBR [30], mediante el cual se identifica la trayectoria de los rayos a través de las dos dimensiones geométricas del edificio, teniendo en cuenta las reflexiones y difracciones de cada uno de los rayos. A partir de esta información se construyen los caminos completos en tres dimensiones considerando los rayos reflejados en el suelo para los cuales se emplea el método de las imágenes, generando el plano 3D de la propagación de los rayos con los cuales se evalúa el campo eléctrico en el área específica de estudio [31].

El modelo se aplica a sistemas que cumplan con los parámetros establecidos en la Tabla 2.3.



CAPITULO 2

Tabla 2.3 Parámetros modelo de cañón urbano

Máximas reflexiones	30
Máximas difracciones	3
Ambiente	Urbano
Terreno	Plano o ligeramente ondulado
Alcance	Aproximadamente 1 km, varía de acuerdo a la aplicación
Altura de las antenas	Inferior a la altura de los edificios
Tipo de antenas	Todos
Trazado de rayos	SBR para el plano horizontal, el método de imagen para la reflexión del suelo
Frecuencia mínima	100 MHz
Frecuencia máxima	Depende de la aplicación

2.5.3 Modelo Urbano Rápido 3D

Este modelo realiza estimaciones de potencia en zonas urbanas o terrenos accidentados con edificaciones o colinas de alturas no uniformes como se muestra en la Figura 2.9, utilizando un rayo de seguimiento en 2D de acuerdo a las huellas de las edificaciones o colinas.

El modelo predice la propagación por línea de vista, por difracción simple o doble difractada en las estructuras de alturas bajas, así como las reflexiones en las paredes de los edificios, difracción en los bordes verticales y las interacciones con el suelo.

La característica del modelo en tres dimensiones se refiere a la consideración de las difracciones de los rayos en los bordes y esquinas sobre los techos de los edificios de altura baja, como se muestra en la Figura 2.10, y no al trazado de rayos en tres dimensiones.



CAPITULO 2



Figura 2.9 Escenario urbano con edificaciones o colinas de altura no uniforme

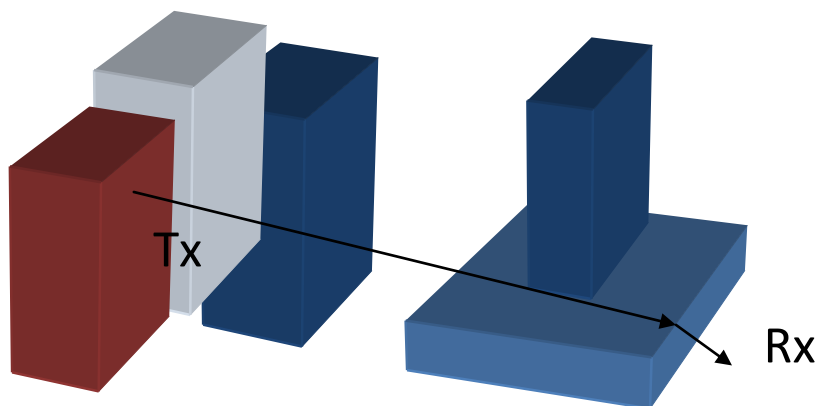


Figura 2.10 Difracción en bordes de edificaciones de baja altura

Este modelo a diferencia del modelo de cañón urbano, toma todas las posibles alturas de las antenas transmisoras y receptoras, al incluir las difracciones verticales y horizontales y las reflexiones en los bordes verticales antes o después de haberse difractado en los bordes de las azoteas.

La Tabla 2.4 muestra los parámetros para la aplicabilidad del modelo urbano rápido 3D.



CAPITULO 2

Tabla 2.4 Parámetros modelo urbano rápido 3D

Máximas reflexiones	30
Máximas difracciones	3
Transmisiones máximas	No aplica
Ambiente	Urbano
Terreno	Plano o ligeramente ondulado
Alcance	Aproximadamente 1 km, varía de acuerdo a la aplicación
Altura de las antenas	Todas
Tipo de antenas	Todos
Trazado de rayos	SBR para el plano horizontal, el método de imagen para la reflexión del suelo y para la trayectoria de los rayos con el numero de interacciones inferior o igual a 2
Frecuencia mínima	100 MHz
Frecuencia máxima	Depende de la aplicación

Este modelo utiliza el método de trazado de rayos SBR para identificar las trayectorias seguidas por los rayos en las dos dimensiones de las edificaciones y localizar los puntos o bordes donde los rayos son difractados [30], además el modelo emplea el método de imagen múltiple aplicado a la geometría tridimensional, a rayos con dos o menos difracciones.

Para la aplicación de estos métodos se establecen dos supuestos, el primero es que se asume que los caminos de transmisión trazados inicialmente no difieren en gran cantidad con los caminos reales en tres dimensiones, es decir, la variación de altura de los caminos seguidos por los rayos de transmisión es demasiado pequeña en comparación con la distancia recorrida hasta el receptor, situación que se presenta cuando la altura de la antena de transmisión es similar a la de recepción. La segunda suposición realizada se refiere a la homogeneidad de las edificaciones en el entorno urbano, considerando que estas estructuras tienen paredes y techos planos y por lo tanto la dispersión de energía verticalmente es despreciable, garantizando que el camino más fuerte se encuentra muy cerca del plano horizontal [31].



CAPITULO 2

2.5.5 Modelo Completo 3D

Modelo de propagación para estimar la cobertura en escenarios de interiores, el cual se caracteriza por no tener restricciones en cuanto a la forma de las estructuras, considerando objetos con todo tipo de irregularidades. El modelo tiene en cuenta transmisiones a través de las superficies de los objetos y reflexiones en pisos, paredes y techo, convirtiéndose en el modelo más completo utilizado por la herramienta de predicción de propagación Wireless InSite® para el análisis en escenarios interiores [13]. La Tabla 2.5 muestra los parámetros para la aplicación del modelo completo 3D.

Tabla 2.5 Parámetros modelo completo 3D

Máximas reflexiones	30, asumiendo que no hay traspaso de señal en la superficie
Máximas difracciones	4 (SBR)
Transmisiones máximas	30, asumiendo que no hay reflexiones
Ambiente	Todos
Terreno	Todos
Interiores	Todos
Objetos	Todos
Alcance	Varía de acuerdo a la aplicación
Altura de las antenas	Todas
Tipo de antenas	Todos
Trazado de rayos	SBR
Frecuencia mínima	100 MHz
Frecuencia máxima	Depende de la aplicación

Si se presentara la máxima cantidad de reflexiones y transmisiones posibles, el tiempo en el cálculo de los trayectos se verá afectado con un incremento en el tiempo de respuesta debido al procesamiento.

El tiempo de cálculo de procesamiento aproximado es proporcional al mostrado en la ecuación 2.14.



CAPITULO 2

$$tc = \frac{(Nr + Nt + 1)!}{Nr! \times Nt!} \quad (2.14)$$

Donde

- tc: Tiempo de cálculo (s)
- Nr: Número de reflexiones
- Nt: Número de traspasos

También es utilizado por la herramienta de predicción de propagación Wireless InSite® el método de trazado de rayos *Eigenray* que se enfoca en la definición explícita de la trayectoria de los rayos entre el transmisor y receptor satisfaciendo el principio de Fermat³¹.

Este método solo tiene en cuenta a los rayos con un máximo de tres reflexiones y difracciones, estimando un tiempo de cálculo proporcional como lo describe la ecuación 2.15.

$$tc = (N_f)^x \quad (2.15)$$

Donde

- Nf es el número de fases geométricas
- X: Número máximo de reflexiones mas difracciones

2.4.6 Modelo Hata

Este modelo se basa en las mediciones de atenuación realizadas por Okumura [32], deduciendo las ecuaciones [33] por regresión simple a partir de las curvas establecidas, incluyendo expresiones para calcular las pérdidas básicas en ambientes urbanos, suburbanos y rurales.

En este modelo no se tiene en cuenta la ondulación del terreno ni el grado de urbanización [34], además el modelo puede ser aplicado sobre el rango de frecuencias de 150 MHz a 1500 MHz. Para efectos de la implementación de este modelo en la herramienta Wireless InSite®, se construye un solo rayo desde el transmisor hasta el receptor, el cual es utilizado para determinar la distancia, tiempo y dirección de llegada y dirección de salida. La Tabla 2.6 muestra los parámetros para la aplicación del modelo Hata.

³¹ El trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es estacionario respecto a posibles variaciones de la trayectoria



CAPITULO 2

Tabla 2.6 Parámetros para el modelo Hata

Máximas reflexiones	No aplica
Máximas difracciones	No aplica
Ambiente	Urbano, suburbano y rural
Urbano	Factores de corrección de las grandes ciudades, ciudades medianas, suburbanas y entornos rurales
Terreno	Plano o ligeramente ondulado
Alcance	De 1 km a 20 km
Altura de las antenas	Transmisor(Estación base) 30 m a 200 m, Receptor (móvil) 10 m
Tipo de antenas	Omnidireccionales
Trazado de rayos	Un solo rayo de Tx a Rx
Frecuencia mínima	150MHz
Frecuencia máxima	1500MHz



3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN Y MEDIDAS REALES

3.1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo de grado se realizó el análisis de la cobertura de un sistema *Wi-Fi* en interiores con la herramienta de predicción de propagación *Wireless InSite®*, usando la técnica de trazado de rayos y el modelo de propagación completo 3D para estimar el rango de cobertura en el escenario de interiores.

Con el fin de validar los datos obtenidos en la simulación se realizó una campaña de recolección de medidas reales usando la plataforma inalámbrica *PowerStation 2®*, comparando estos resultados con la simulación para determinar la precisión de la técnica de trazado de rayos y el modelo de propagación usados por la herramienta software.

El presente capítulo muestra el diseño, implementación y pruebas realizadas de la simulación mencionada, además de la presentación de los resultados a nivel de simulación y de campo real.

3.2 METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Se utilizó una metodología de desarrollo basada en un enfoque sistemático para el diseño y desarrollo de este trabajo de grado, lo cual facilitó la elección, diseño e implementación del escenario mediante la aplicación del modelo lineal secuencial, el cual se muestra en la Figura 3.1 el cual implica la ejecución de una serie de fases o etapas ordenadas, las cuales al desarrollarse permiten determinar el grado de precisión de la predicción realizada por la herramienta *Wireless InSite®* al comparar estos resultados con las medidas de campo tomadas en el escenario real.

El desarrollo de cada una de las fases utilizadas se describe de manera general a continuación:



CAPITULO 3

- **Análisis de requerimientos:** Se estableció el dominio del problema considerando toda la información que permitió identificar detalladamente el escenario de trabajo.
- **Diseño:** En esta fase se determinó el proceso para la construcción del escenario de simulación.
- **Implementación:** En esta fase se realizó la simulación siguiendo el proceso definido en la etapa de diseño.
- **Pruebas:** Se realizaron pruebas de funcionalidad, con el fin de detectar errores y garantizar que la simulación ofrecía los resultados esperados.

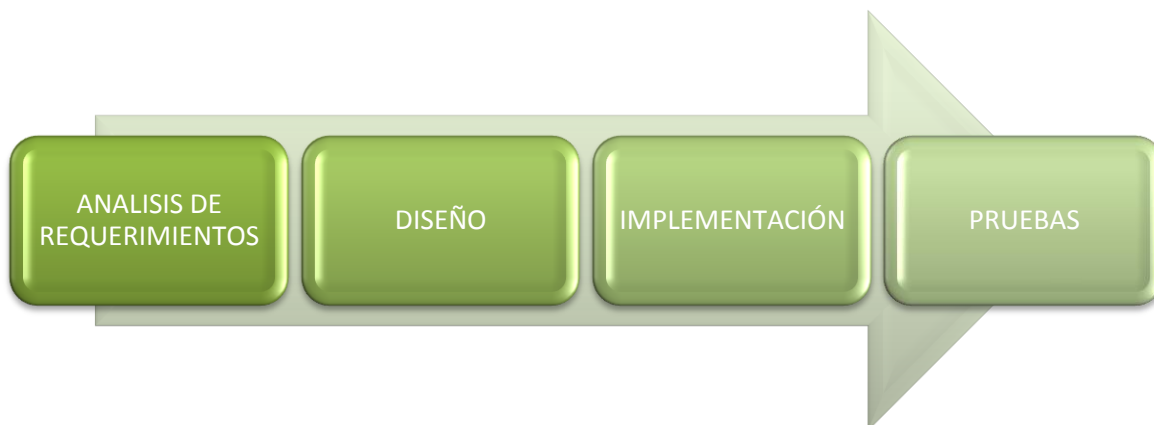


Figura 3.1 Modelo lineal secuencial o ciclo de vida

3.2.1 Análisis de Requerimientos

En esta fase se extrajeron los requerimientos más relevantes que permitieron la construcción del escenario de simulación.

Lista de requerimientos

Requerimiento 1: Seleccionar el escenario de simulación que se construirá con la herramienta de predicción.

Requerimiento 2: Especificar las características físicas del escenario real, tales como ubicación, tamaño y material de cada elemento de la estructura.

Requerimiento 3: Establecer la ubicación del transmisor y los receptores.



CAPITULO 3

Requerimiento 4: Presentar los resultados de estimación de cobertura del sistema en el escenario simulado.

Requerimiento 5: Recolectar de medidas de campo real.

Requerimiento 6: Presentar de los resultados de la cobertura del sistema en el escenario real.

Requerimiento 7: Realizar análisis comparativo de los resultados de simulación y de las medidas de campo real. Este análisis se realizara y presentara en el siguiente capítulo de este trabajo de grado.

3.2.2 Diseño

En esta fase de desarrollo se construye el escenario de simulación a partir de los parámetros extraídos del escenario real para construir de una forma precisa o aproximada el escenario de simulación y se determinan los parámetros que se utilizan en el sistema.

3.2.2.1 Identificación del Escenario de Simulación

El escenario seleccionado para el desarrollo de este trabajo de grado corresponde al pasillo del segundo piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca Para realizar un adecuado modelado del escenario es preciso definir los detalles que deben ser considerados para la construcción de la estructura, por lo cual se siguen estos pasos:

1. Identificar y ubicar puertas, ventanas, corredores y salones.
2. Identificar los materiales que constituyen las estructuras presentes en el escenario.
3. Establecer la dimensión de los objetos que hayan sido identificados.
4. Realizar un plano en dos dimensiones teniendo en cuenta las medidas realizadas en el escenario.
5. Realizar el modelado en tres dimensiones del escenario definido previamente utilizando la herramienta Wireless InSite®.

Para desarrollar adecuadamente la fase de pruebas de este trabajo de grado se siguen los siguientes pasos:



CAPITULO 3

6. Distribuir de manera aleatoria un transmisor y un número n de receptores por el escenario.
7. Realizar pruebas de predicción de cobertura variando la ubicación del transmisor y manteniendo fijos los receptores, para identificar cual es el punto óptimo para ubicar el transmisor de tal manera que brinde la mejor cobertura para el sistema.
8. Calcular la cobertura a un número n de receptores haciendo uso del modelo de propagación Completo 3D utilizando la técnica de trazado de rayos SBR.
9. Recolectar medidas de campo real con base en las simulaciones definidas.
10. Evaluar los resultados obtenidos mediante la comparación de las medidas recolectadas en el escenario real y las medidas obtenidas a partir de la simulación.

3.2.2.2 Parámetros del Sistema

Se diseño que el sistema bajo análisis cumple con las especificaciones del estándar IEEE 802.11b, con un transmisor y un número n de receptores, sistema con el cual se busca obtener la mejor cobertura en el escenario interior seleccionado.

El estándar seleccionado utiliza la banda de frecuencias de operación ISM de 2.4 GHz, en donde se divide el espectro en partes iguales distribuidas sobre la banda en canales individuales cuyo tamaño depende de la técnica de transmisión usada a nivel físico.

El sistema diseñado utiliza la técnica de transmisión de Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, *Direct Sequence Spread Spectrum*, la cual reemplaza por una secuencia de bits para cada uno de los bits que componen la señal a transmitir, incrementando la resistencia de la señal a las interferencias a medida que este patrón de bits sea mayor, como se muestra en la Figura 3.2.

La técnica DSSS utiliza un rango de frecuencias de operación que va desde 2.4 GHz hasta 2.4835 GHz, permitiendo utilizar un ancho de banda total de 83.5 MHz el cual se subdivide en 15 canales con una separación de 5 MHz como se muestra en la Tabla 3.1 y la Figura 3.3, donde también se especifica el uso de un subconjunto de estos canales para cada región o país en particular.



CAPITULO 3

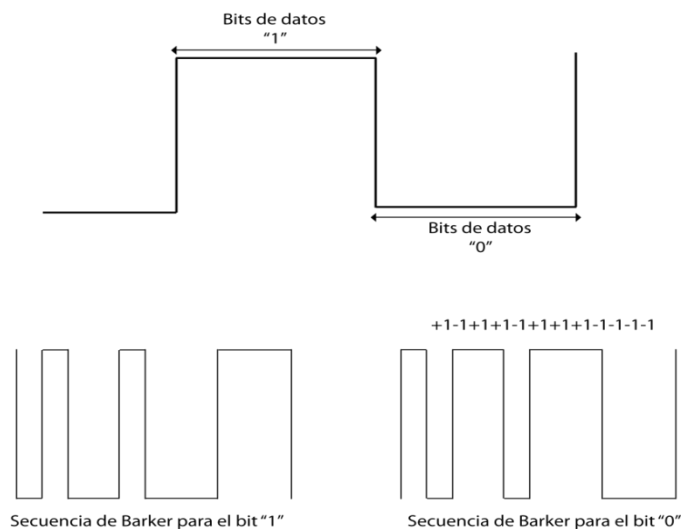


Figura 3.2 Secuencia de Barker

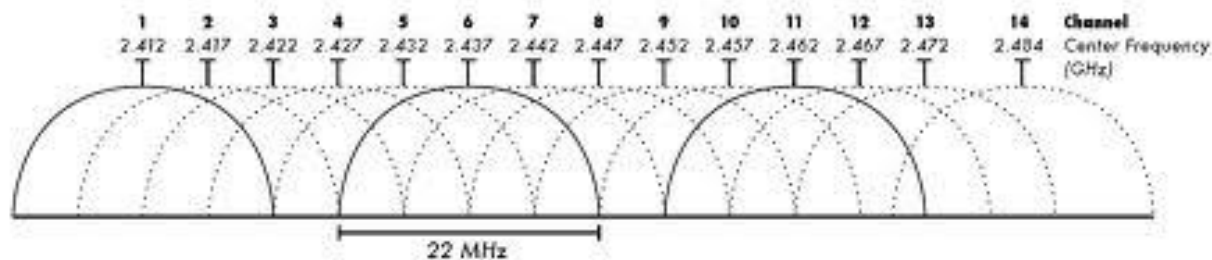


Figura 3.3 Canalización y Técnica DSSS para IEEE 802.11b

Tabla 3. 1 Frecuencia y canalización para IEEE 802.11 utilizando DSSS

NUMERO DE CANAL	FRECUENCIA (GHz)	NORTE AMERICA	EUROPA	ESPAÑA	FRANCIA	JAPON
1	2.412	X	X			
2	2.417	X	X			
3	2.422	X	X			
4	2.427	X	X			
5	2.432	X	X			
6	2.437	X	X			
7	2.442	X	X			
8	2.447	X	X			
9	2.452	X	X			



CAPITULO 3

10	2.457	X	X	X	X	
11	2.462	X	X	X	X	
12	2.467		X		X	
13	2.472		X		X	
14	2.483					X

Para este sistema se seleccionó el canal número uno, canal que se selecciono por no ser utilizado por otro sistema en el mismo escenario evitando tener contribuciones de potencia que alteraran las medidas recolectadas, canal cuya frecuencia central de operación es de 2.412 GHz con un ancho de banda de 22 MHz, en la cual es configurado el transmisor y receptor con los parámetros que se muestran en la Tabla 3.2, los cuales corresponden a las especificaciones del estándar IEEE 802.11b y a los parámetros de configuración de la plataforma inalámbrica PowerStation2® utilizada para la implementación del sistema real en el escenario seleccionado y la sensibilidad de los receptores.

Tabla 3.2 Configuración del transmisor y receptor

Potencia de transmisión	23dBm (200mW)
Frecuencia de operación	2.412 GHz
Número de canal	1
Ancho de banda del canal	22 MHz
Altura de antenas Tx- Rx	1m
Tipo de antena	Direccional
Ganancia	17dBi
Sensibilidad de antena receptora	-96dBm
ROE	1
Temperatura	293k

En el anexo B se encuentra en detalle las características y parámetros de la plataforma inalámbrica PowerStation2® para la toma de medidas reales

3.2.3 Implementación

En esta fase se analizará y evaluará la cobertura del sistema Wi-Fi desplegado en el escenario seleccionado.



CAPITULO 3

3.2.3.1 Modelado de la Estructura

Para obtener una predicción más precisa del comportamiento de las ondas propagadas en el escenario seleccionado, es necesario definir en detalle los materiales con los cuales está construida la estructura, considerando las propiedades físicas de los mismos, tales como:

✓ **Grosor**

Este parámetro es especificado en metros y está relacionado con los coeficientes de reflexión y transmisión, aunque en algunos casos solo es utilizado para propósitos de representación estética o de apariencia, definiéndose como la acumulación del espesor de cada una de las capas utilizadas en la estructura.

✓ **Permitividad**

Constante física que describe como un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. Para la utilización de este parámetro se considera como referencia la permitividad del vacío, sin embargo la herramienta de simulación define esta propiedad para cada material y además permite su modificación. Sus unidades son picofaradios por metro (pF/m).

✓ **Conductividad**

Esta propiedad natural indica la capacidad de los cuerpos para permitir el paso de corriente eléctrica a través de ellos, convirtiéndose en una de las características más importantes de los materiales, definiéndose como el inverso de la resistividad y especificado en la herramienta en unidades de Siemens por metro (S/m).

Para el escenario seleccionado se han identificado cuatro materiales principales que componen la estructura, los cuales son mostrados en la Tabla 3.3 con sus principales características. Los valores establecidos para cada una de las propiedades de los materiales son los utilizados por defecto en la herramienta de predicción, limitándose solo al cambio del grosor correspondiente a los objetos que componen el escenario.

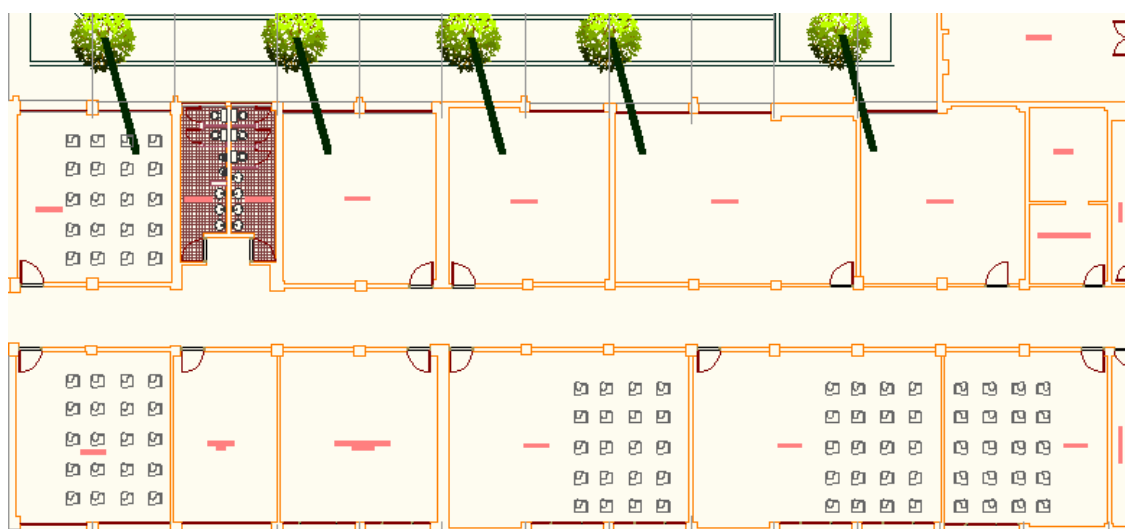
Tabla 3.3 Propiedades de los materiales utilizados

MATERIALES	PERMITIVIDAD (pF/m)	CONDUCTIVIDAD (S/m)	GROSOR (m)
Ladrillo	4.44	0.001	0.125
Madera	5	0	0.04
Vidrio	2.4	0	0.005
Concreto	15	0.015	0.3

3.2.3.2 Construcción de la Estructura

Luego de que los materiales han sido definidos y caracterizados, se procedió con la identificación de los objetos que hacen parte de la estructura del escenario como ventanas, puertas, corredores y salones, lográndose de esta manera diseñar un plano en dos dimensiones, como se muestra en la Figura 3.4, el cual brinda una perspectiva general del escenario que se desea simular. Para definir de manera más precisa estos objetos es necesario que se haga una toma de medidas en el escenario real con el fin de modelar cada uno de los espacios y cuerpos del mismo de manera más precisa dentro de la herramienta.

Con base en el plano en dos dimensiones, y utilizando la herramienta de predicción se realizó el modelado de la estructura para obtener el escenario en tres dimensiones, el cual se muestra en la Figura 3.5; para ver con más detalle la generación de la estructura utilizada en este trabajo de grado remitirse al anexo A.

**Figura 3.4** Plano en dos dimensiones del escenario de simulación

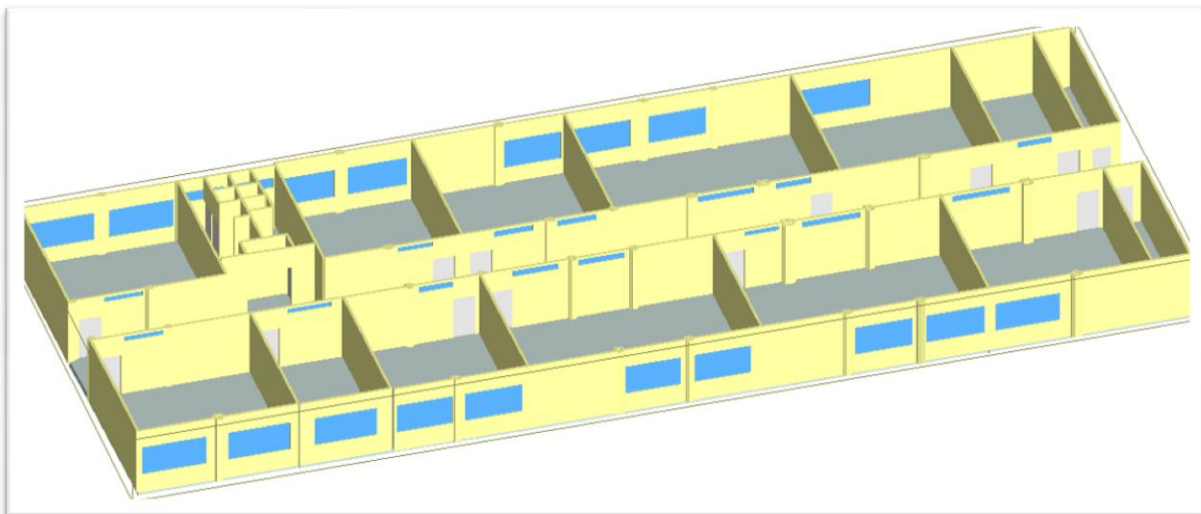


Figura 3.5 Escenario de trabajo modelado en Wireless InSite®

3.2.4 Pruebas

En esta fase se ejecutan los pasos definidos en la fase de diseño para las pruebas a nivel de simulación con el objetivo de encontrar la mejor posición para el transmisor del sistema en el escenario y hacer un mejor uso de los recursos, para lo cual se realizó un número considerable de simulaciones que permitió identificar este punto, así como la ubicación de un número n de receptores a los que se les realizó una estimación a nivel de potencia para posteriormente comparar y analizar estos resultados con medidas de campo real para establecer el grado de precisión de la técnica de trazado de rayos utilizada por la herramienta de predicción de propagación.

3.2.4.1 *Plan de Pruebas*

El plan de pruebas inicial para determinar la ubicación del transmisor consistió en la realización de un número suficiente de simulaciones que permitieron establecer el mejor punto de transmisión para brindar la mejor cobertura en el escenario seleccionado. Considerando que un total de 100 puntos de transmisión fue suficiente para identificar el mejor sitio de transmisión en el escenario propuesto. Estas simulaciones permitieron visualizar de manera general la potencia en cada punto de recepción del escenario. Se seleccionaron específicamente 21 puntos de recepción en todo el escenario.



CAPITULO 3

En la Tabla 3.4 se muestran las simulaciones más significativas que fueron seleccionadas para la presentación de resultados en este trabajo de grado donde se presenta una posición óptima, una media y una menos favorable para la ubicación del transmisor del sistema en el escenario a nivel de cobertura.

Tabla 3.4 Simulaciones más significativas del sistema

Número de simulación	Número de receptores	Separación entre receptores (m)	Cobertura
1	3094	0.5	óptima
2	3050	0.6	no favorable
3	3121	0.45	media

3.2.4.2 Simulaciones

3.2.4.2.1 Simulación 1: mejor cobertura

En esta simulación se ubico el transmisor en el extremo izquierdo del inicio del pasillo con la configuración de la plataforma inalámbrica PowerStation2® establecida en la Tabla 3.2, como se muestra en la Figura 3.6 y se genero una grilla de recepción de 3094 puntos ubicados por todo el escenario con una separación de 0.5 m entre los distintos puntos de recepción que forman la grilla. Se ejecutó con lo cual al ejecutar la simulación utilizando el método SBR como la técnica de trazado de rayos y el modelo de propagación completo 3D. El resultado de la estimación de cobertura, se muestra en la Figura 3.7.

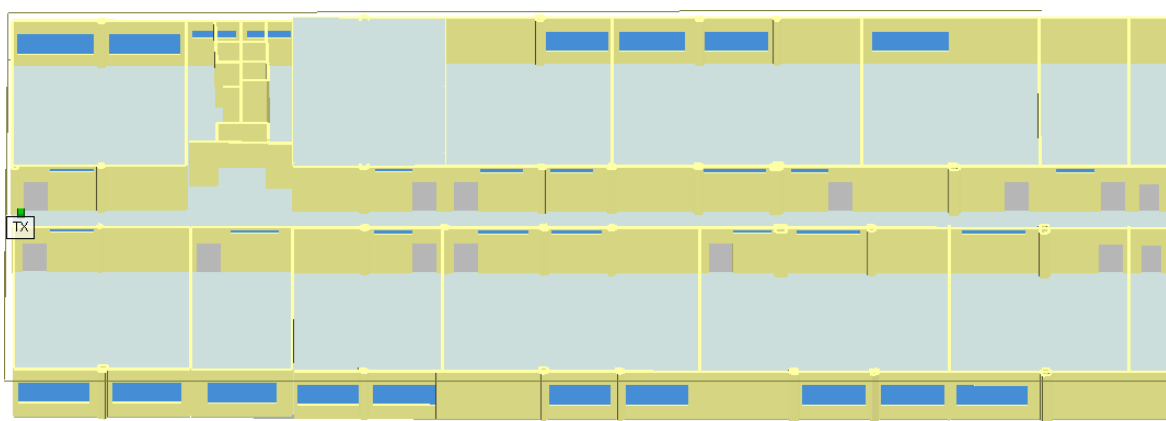


Figura 3.6 Ubicación del transmisor en la simulación 1

El sistema presentó en el escenario definido una variación de potencia de recepción en un rango de 12.8 dBm a -143.7dBm, teniendo en cuenta que la



CAPITULO 3

sensibilidad de los receptores es de -96dBm , se determina una cobertura del 98.91% del área total del escenario aproximadamente.

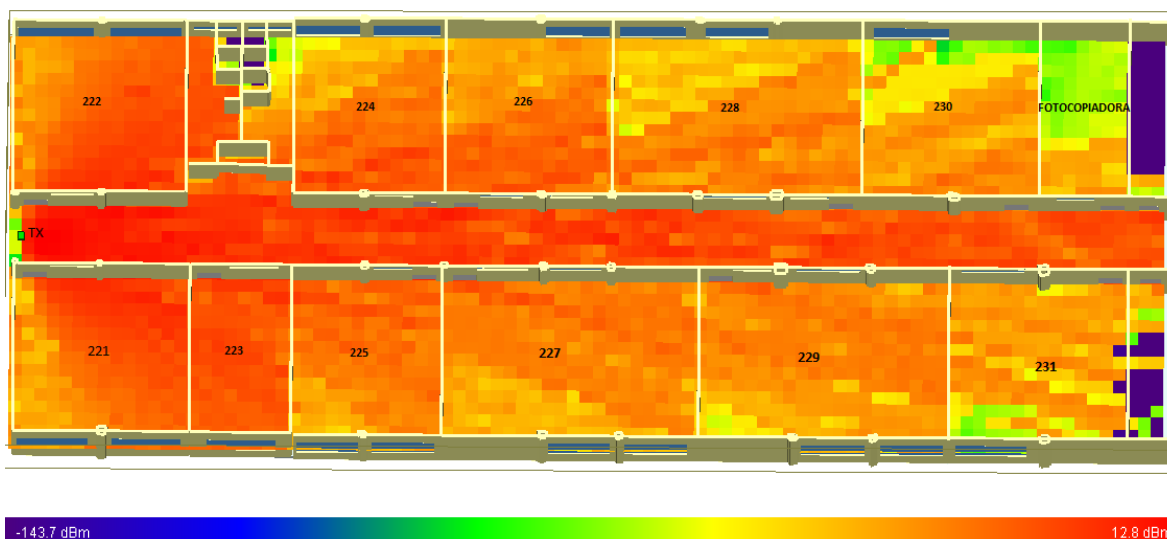


Figura 3.7 Cobertura del sistema en la simulación 1

Para una mejor percepción de los resultados, se distribuyeron 21 puntos de recepción por todo el escenario, como se muestra en la Figura 3.8. En estos puntos específicos de recepción, se visualizó la predicción de cobertura mediante el uso de la herramienta software, la cual hace uso del método SBR como técnica de trazado de rayos y el modelo de propagación completo 3D.

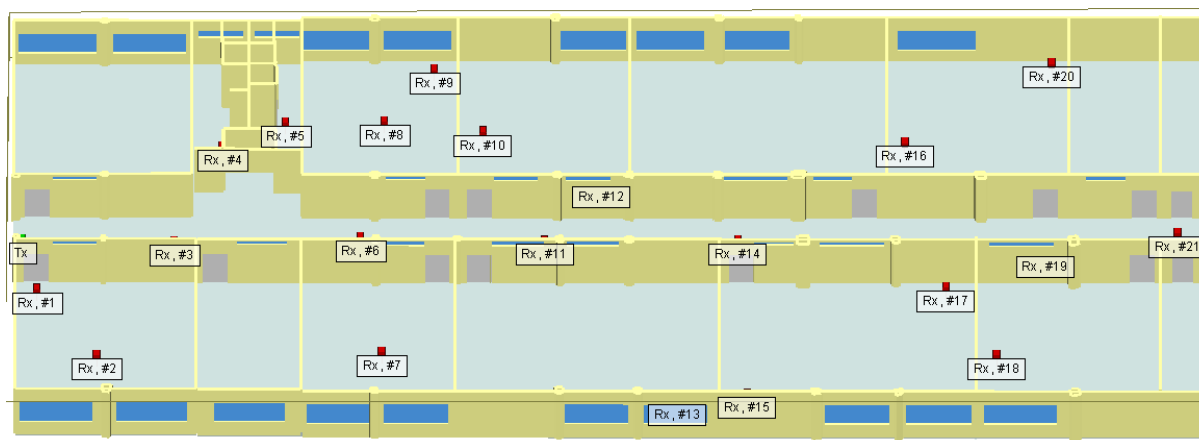


Figura 3.8 Ubicación puntual de receptores



CAPITULO 3

Una vez definido el escenario de trabajo con los puntos de recepción y el punto de transmisión se ejecutó el trazado de rayos entre el transmisor y cada uno de los 21 receptores distribuidos en el escenario, tal como se muestra en la Figura 3.9.

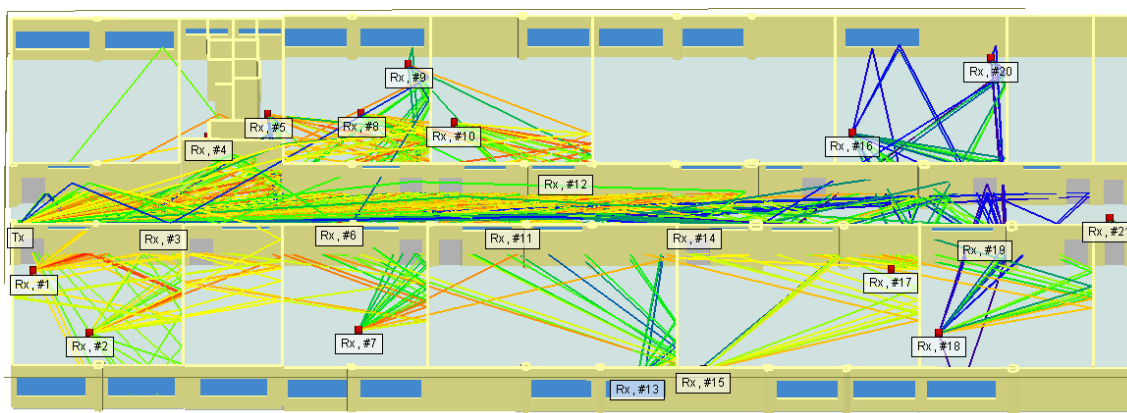


Figura 3.9 Trazado de rayos en el escenario para los 21 receptores en la simulación 1

En la Tabla 3.5 se observan los resultados obtenidos en la simulación 1, representados en la Figura 3.10.

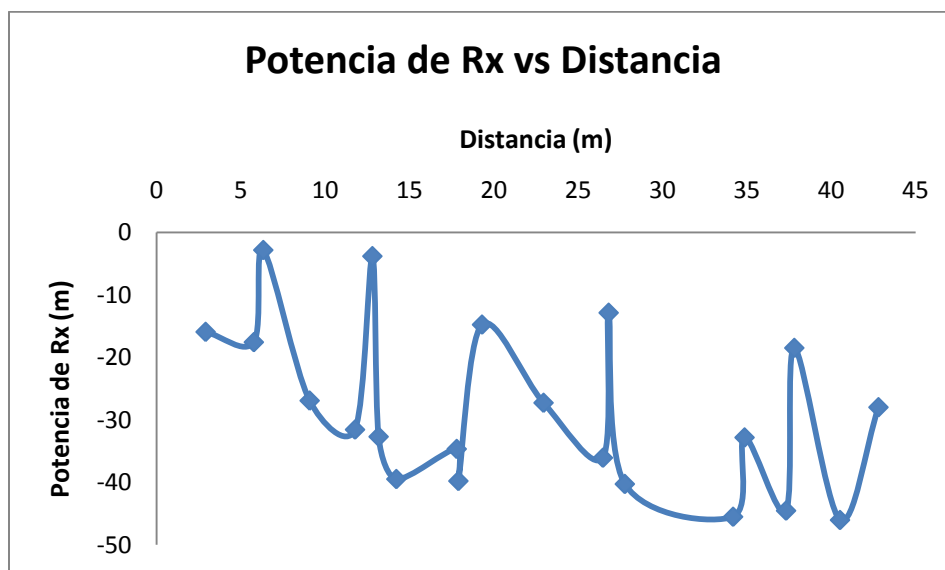


Figura 3.10 Potencias de recepción puntuales en la simulación 1



CAPITULO 3

Tabla 3.5 Resultados en la simulación 1

Número de receptor	Distancia (m)	Potencia de Rx (dBm)	Ubicación en la grilla
1	2.91	-15.92	1004
2	5.77	-17.57	552
3	6.33	-2.82	1652
4	9.08	-26.93	2202
5	11.77	-31.57	2570
6	12.8	-3.8	1483
7	13.17	-32.7	389
8	14.22	-39.49	2666
9	17.8	-34.67	3036
10	17.9	-39.8	2674
11	19.3	-14.76	1587
12	22.95	-27.28	2049
13	26.47	-36.08	143
14	26.81	-12.86	1420
15	27.77	-40.28	237
16	34.19	-45.53	2526
17	34.87	-32.83	1163
18	37.33	-44.55	439
19	37.82	-18.49	1351
20	40.53	-46.05	2993
21	42.81	-27.99	1816

3.2.4.2.2 *Simulación 2: cobertura no favorable*

En esta simulación se cambia la ubicación del transmisor estableciéndolo dentro de uno de los salones del escenario con la configuración detallada en la Tabla 3.2, como se muestra en la Figura 3.11 y se genera una grilla de recepción de 3050 puntos ubicados por todo el escenario con una separación de 0.6 m de un punto a otro.

Al ejecutar la simulación utilizando la técnica de trazado de rayos usando el método SBR y el modelo de propagación completo 3D, el sistema presenta una variación de potencia de recepción en un rango de -13.6 dBm a -171.6 dBm, determinando una cobertura del 75.29% del área total del escenario, como se muestra en la Figura 3.12.



CAPITULO 3



Figura 3.11 Ubicación del transmisor en la simulación 2

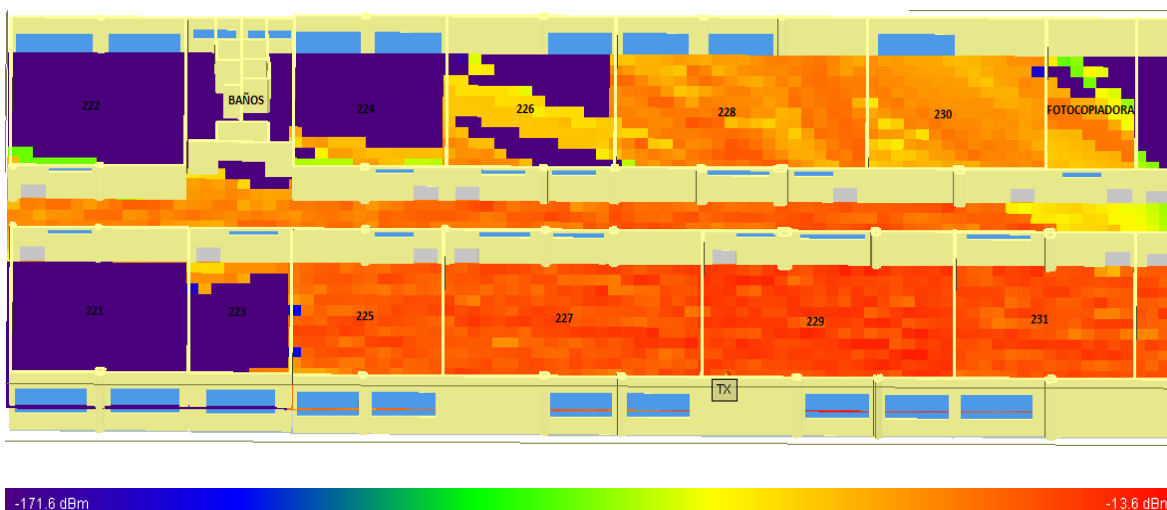


Figura 3.12 Cobertura del sistema en la simulación 2

Para visualizar claramente el trazado de rayos en esta simulación, se han definido 13 receptores por todo el escenario como se muestra en la Figura 3.13, enumerados en orden ascendente de acuerdo a la distancia de separación entre el transmisor y cada punto de recepción. Ejecutándose de esta manera la simulación utilizando la técnica de trazado de rayos y el modelo de propagación completo 3D realizando el trazado de rayos para cada receptor como se muestra en la Figura 3.14.



CAPITULO 3

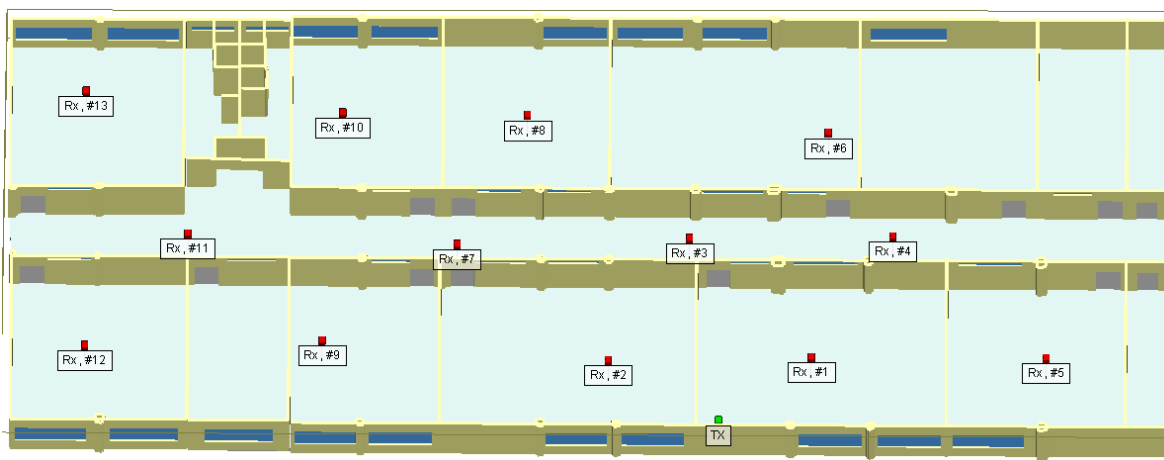


Figura 3.13 Ubicación puntual de receptores en la simulación 2

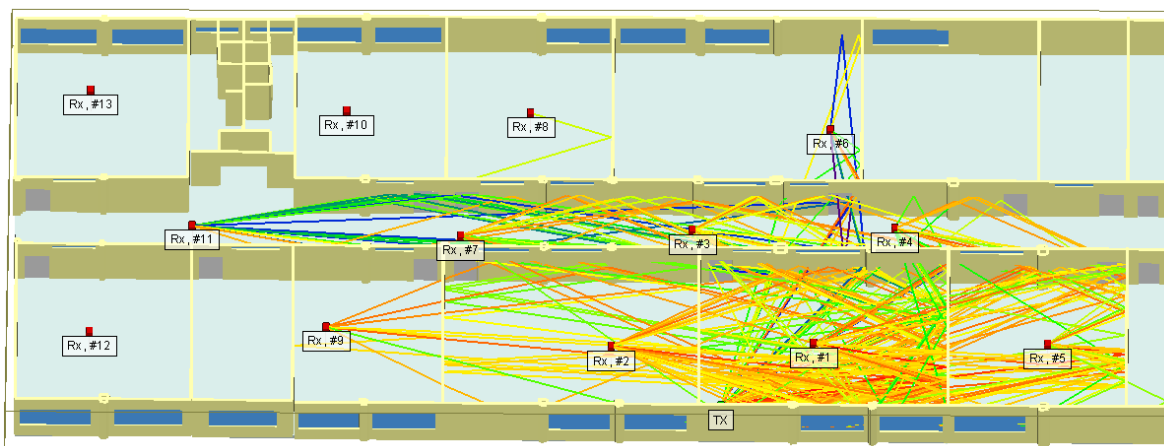


Figura 3.14 Trazado de rayos para 13 receptores en la simulación 2

En la Tabla 3.6 se presentan los resultados obtenidos en esta simulación que se representan en la Figura 3.15.

Tabla 3.6 Resultados en la simulación 2

Número de receptor	Distancia (m)	Potencia de Rx (dBm)	Ubicación en la grilla
1	4.73	-17.72	611
2	5.52	-11.01	684
3	7.73	-20.63	1602



CAPITULO 3

4	8.78	-24.58	1433
5	13.95	-22.92	721
6	14.59	-53.39	2429
7	15.76	-29.11	1494
8	15.84	-44.62	2499
9	15.86	-24.59	391
10	19.18	-137.61	2393
11	22.19	-36.44	1562
12	24.96	-144.57	644
13	27.66	-156.23	2556

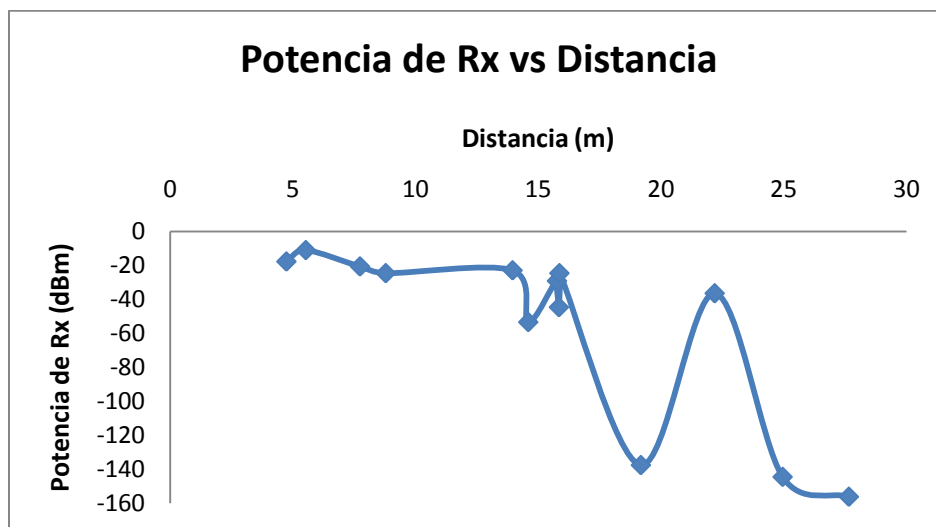


Figura 3.15 Potencias de recepción puntuales en la simulación 2

3.2.4.2.3 Simulación 3: cobertura media

Para esta simulación se ubica el transmisor en el pasillo del escenario usando la misma configuración de las simulaciones mencionadas anteriormente, como se muestra en la Figura 3.16 y se elabora una grilla de recepción de 3121 puntos ubicados por todo el escenario con una separación de 0.45 m de un punto a otro estimando la cobertura del sistema como se muestra en la Figura 3.17.



CAPITULO 3

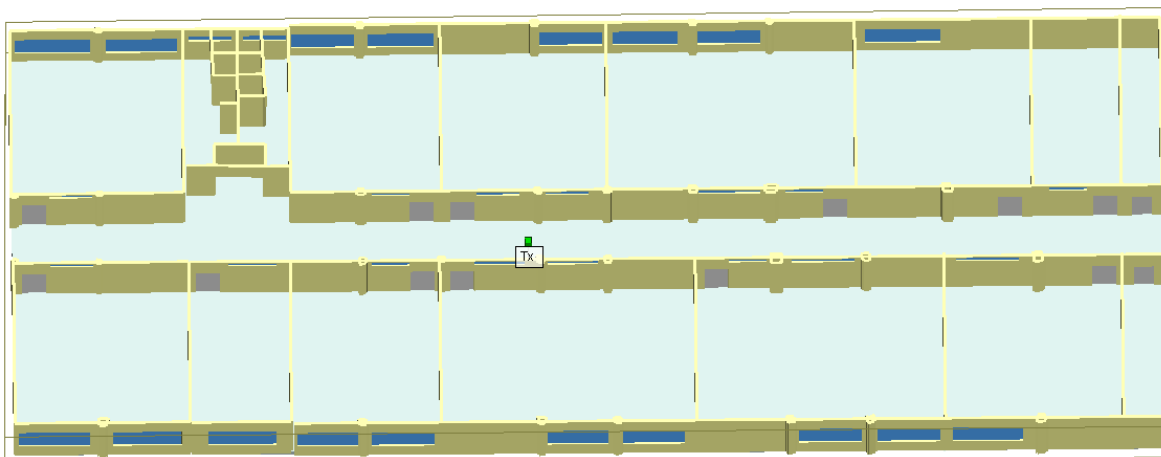


Figura 3. 16 Ubicación del transmisor en la simulación 3

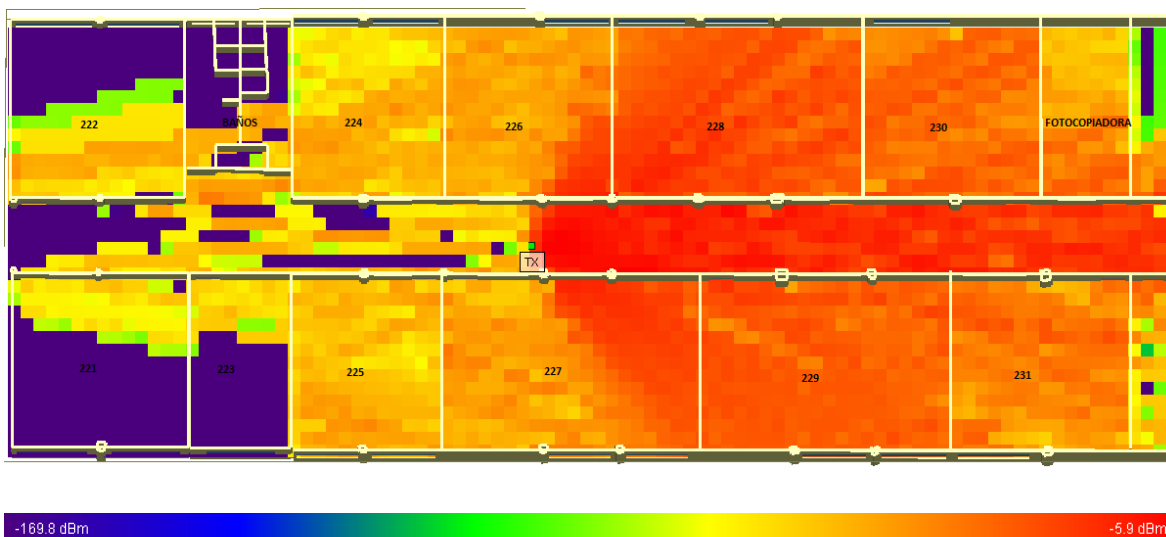


Figura 3.17 Cobertura del sistema en la simulación 3

El sistema presenta una variación de potencia de recepción en un rango de -5.9 dBm a -169.8 dBm, determinando en el escenario una cobertura del 89.94 % del área total aproximadamente.

En el siguiente capítulo se realiza el análisis de las simulaciones 1 y 2, donde se presentan la mejor y la peor condición para el sistema respectivamente en comparación a la cobertura en el escenario real.



3.2.4.3 Medidas Reales

Para recolectar las medidas reales se utilizó la configuración de parámetros definidos para cada simulación, teniendo en cuenta que los datos recopilados corresponden a las simulaciones que presentan la mejor y peor cobertura del sistema.

3.2.4.3.1 Medidas en la Simulación 1: mejor cobertura

Estos resultados se presentan en la Tabla 3.7 donde los equipos de transmisión y recepción utilizados fueron configurados con los parámetros correspondientes a la Tabla 3.3, realizando las respectivas variaciones de ubicación para cada punto de recepción registrando la potencia recibida teniendo en cuenta que las antenas fueran alineadas debido a su tipo, con el fin de captar la mayor cantidad de señal como fue simulado.

Tabla 3.7 Resultados de medidas reales en la simulación 1

Número de receptor	Distancia (m)	Potencia de Rx (dBm)
1	2.91	-16
2	5.77	-17
3	6.33	-7
4	9.08	-25
5	11.77	-32
6	12.8	-4
7	13.17	-35
8	14.22	-40
9	17.8	-37
10	17.9	-53
11	19.3	-14
12	22.95	-30
13	26.47	-41
14	26.81	-13
15	27.77	-39
16	34.19	-44
17	34.87	-33
18	37.33	-41
19	37.82	-16
20	40.53	-49
21	42.81	-28



CAPITULO 3

La representación gráfica de los datos recolectados en el escenario real se muestra en la Figura 3.18.

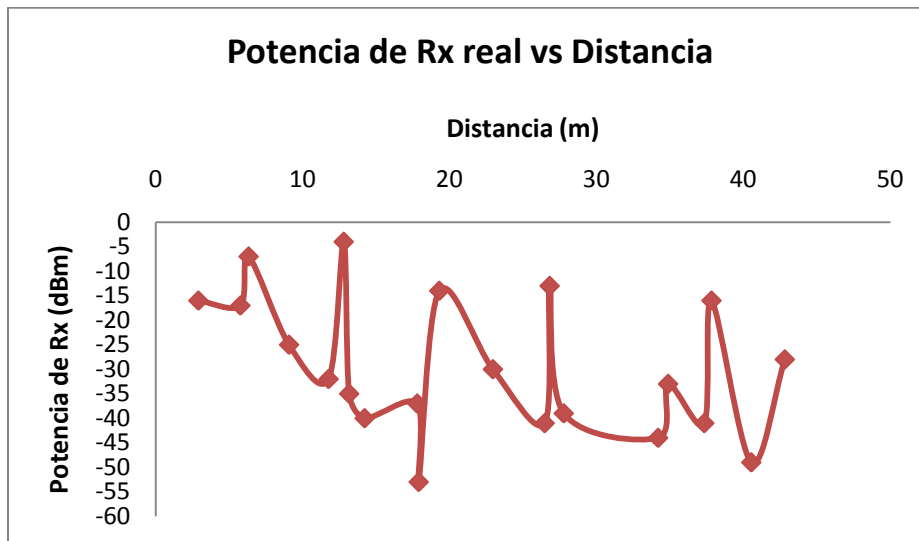


Figura 3.18 Potencia de recepción real en la simulación 1

3.2.4.3.1 Medidas de la Simulación 2: cobertura no favorable

Los datos obtenidos de las medidas reales de potencia de recepción para esta simulación se presentan en la Tabla 3.8, estableciendo la ubicación de los receptores como se muestra en la Figura 3.19 y configurando la plataforma inalámbrica de transmisión y recepción PowerStation2® con los parámetros de la Tabla 3.2.

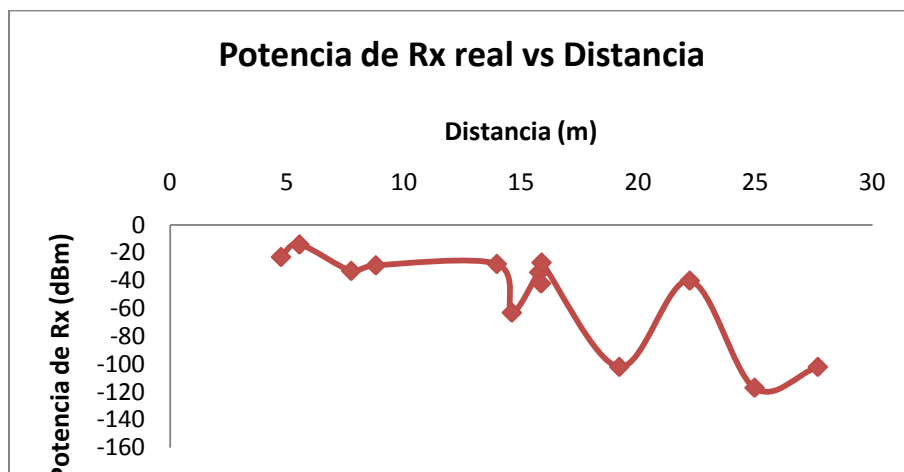


Figura 3.19 Potencia de recepción real en la simulación 2



CAPITULO 3

Tabla 3.8 Resultados de medidas reales en la simulación 2

Número de receptor	Distancia (m)	Potencia de Recepción (dBm)
1	4.73	-23
2	5.52	-14
3	7.73	-33
4	8.78	-29
5	13.95	-28
6	14.59	-63
7	15.76	-34
8	15.84	-42
9	15.86	-27
10	19.18	-102
11	22.19	-40
12	24.96	-117
13	27.66	-102



4

ANÁLISIS DE MEDIDAS Y RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESCENARIO DE INTERIORES

4.1 INTRODUCCIÓN

Las señales *Wi-Fi* desplegadas en escenarios de interiores presentan altos niveles de dispersión y reflexión, los cuales suelen ser mecanismos condicionantes y restrictivos en la propagación de las señales radioeléctricas, es por esto que la caracterización y el análisis del canal de propagación inalámbrico se convierte en un paso indispensable en la planeación de la cobertura de un sistema *Wi-Fi* en esta clase de escenarios, ya que permite conocer y simular las condiciones del medio físico sobre el cual operan estos sistemas de comunicación inalámbricos.

Una vez concluida las campañas de medidas reales, se inicia con el análisis de los resultados obtenidos considerada la fase más importante de este trabajo de grado. Este análisis se centra en la manipulación de hechos y números para concluir cierta información que ayudará a tomar una decisión apropiada respecto al análisis de cobertura en el escenario de interiores [35].

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos con la herramienta de predicción de propagación y cobertura *Wireless InSite®* especificadas en el capítulo anterior para las simulaciones 1 y 2, las cuales presentan la mejor y peor cobertura sobre el escenario de interiores en estudio, además se comparan dichos resultados con las medidas reales para estimar el grado de precisión que presenta el uso de la técnica de trazado de rayos (SBR) y el modelo de propagación utilizado (completo 3D) en la predicción de la propagación y la cobertura de un sistema *Wi-Fi* en un escenario de interiores.

Además se realiza un estudio de caracterización del canal de comunicación inalámbrico del escenario de interiores con el fin de determinar la naturaleza de la propagación de las señales radioeléctricas sobre el escenario.



CAPITULO 4

4.2 VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE TRAZADO DE RAYOS

Con el fin de calcular el grado de precisión de los resultados obtenidos en la simulación con la herramienta de predicción de propagación y cobertura Wireless InSite®, se realizó una comparación puntual de los resultados arrojados por la herramienta con las medidas reales efectuadas sobre el escenario de interiores con la plataforma inalámbrica PowerSation 2® que se realizaron en el capítulo anterior.

En la Figura 4.1 se muestran los puntos de referencia en la toma de las medidas reales y en la simulación 1.

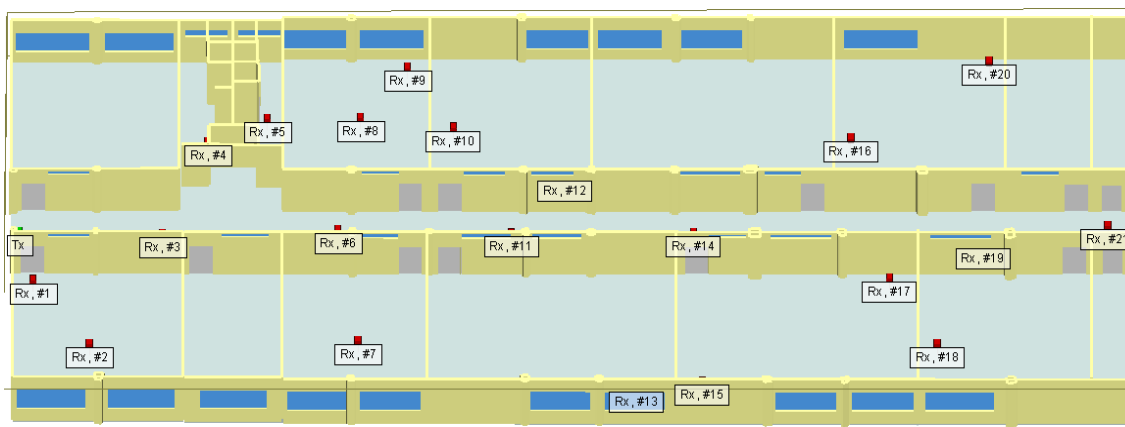


Figura 4. 1 Ubicación puntual de receptores en la simulación 1

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados de las medidas reales con la plataforma inalámbrica PowerSation 2® y los resultados arrojados por la herramienta de predicción de propagación y cobertura Wireless InSite®.

Teniendo en cuenta que para una potencia transmitida fija, la potencia recibida se considera una variable aleatoria, se procede a calcular la media³², varianza³³ y desviación estándar³⁴, además de diferentes medidas de dispersión³⁵ y precisión de la estimación partiendo de la hipótesis de que los resultados estudiados representan una muestra de la población total.

³² La media es la cantidad total de la variable distribuida en partes iguales entre cada observación.

³³ La varianza de una variable aleatoria es una medida que permite identificar la dispersión promedio que hay entre cada uno de los valores respecto a su punto central.

³⁴ La desviación estándar o desviación típica es una medida de dispersión que permite determinar el promedio de fluctuación de los datos respecto a su media.

³⁵ Las medidas de dispersión permiten reconocer que tanto se desvían los datos alrededor del punto central.



CAPITULO 4

Los cálculos estadísticos mencionados anteriormente junto con la aplicación de una serie de medidas de precisión de pronóstico³⁶ se ejecutaron para identificar que tanto varían los resultados de potencia entre las medidas reales y las medidas estimadas por la herramienta. Con el fin de obtener un valor cuantitativo de la precisión de la herramienta Wireless InSite® en el uso del trazado de rayos en la predicción de la cobertura del escenario de interiores [36].

Tabla 4. 1 Potencia de recepción estimada en la simulación 1 y medidas reales en los puntos de referencia

Número de receptor	Potencia de Rx Medida (dBm)	Potencia de Rx Estimada (dBm)	Distancia (m)	Ubicación en la grilla
1	-16	-15.92	2.91	1004
2	-17	-17.57	5.77	552
3	-7	-2.82	6.33	1652
4	-25	-26.93	9.08	2202
5	-32	-31.57	11.77	2570
6	-4	-3.8	12.8	1483
7	-35	-32.7	13.17	389
8	-40	-39.49	14.22	2666
9	-37	-34.67	17.8	3036
10	-53	-39.8	17.9	2674
11	-14	-14.76	19.3	1587
12	-30	-27.28	22.95	2049
13	-41	-36.08	26.47	143
14	-13	-12.86	26.81	1420
15	-39	-40.28	27.77	237
16	-44	-45.53	34.19	2526
17	-33	-32.83	34.87	1163
18	-41	-44.55	37.33	439
19	-16	-18.49	37.82	1351
20	-49	-46.05	40.53	2993
21	-28	-27.99	42.81	1816

Haciendo uso de la ecuación 4.1 se realiza el cálculo de la media.

³⁶ Las medidas de precisión de pronósticos se usan para determinar que tan eficaz es un pronóstico a través del cálculo de su precisión con respecto a los valores reales.



CAPITULO 4

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (4.1)$$

Donde:

- P_i : Potencia de recepción de la muestra (dBm).
- n : Tamaño de la muestra.

Por lo tanto, se tiene:

$\bar{P} = -29.23 \text{ dBm}$ Para la potencia de recepción medida.

$\bar{P} = -28.18 \text{ dBm}$ Para la potencia de recepción estimada.

La varianza se puede calcular mediante la ecuación 4.2.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{(n-1)} \quad (4.2)$$

Donde:

- P_i : Potencia de recepción de la muestra.
- \bar{P} : potencia media de recepción de la muestra.

Por lo tanto, se tiene:

$\sigma^2 = 196.19$ Para la potencia de recepción medida.

$\sigma^2 = 173.362$ Para la potencia de recepción estimada.

La desviación estándar se puede calcular mediante la ecuación 4.3.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (4.3)$$

Donde:

- σ^2 = Varianza

Por lo tanto, se tiene:

$\sigma = 14$ Para la potencia de recepción medida.

$\sigma = 13.16$ Para la potencia de recepción estimada.



CAPITULO 4

En la Tabla 4.2 se muestra el cálculo del error absoluto³⁷ y del error relativo³⁸ expresado en porcentaje utilizando las ecuaciones 4.4 y 4.5 respectivamente. Para cada uno de los puntos que se tomaron en cuenta en la comparación de los resultados de la simulación con las medidas reales.

$$E_{Absoluto} = | Prx_{Medida} - Prx_{Estimada} | \tag{4.4}$$

$$E_{Relativo} = \left| \frac{Prx_{Medida} - Prx_{Estimada}}{Prx_{Medida}} \right| * 100 \tag{4.5}$$

Tabla 4. 2 Medida de error de cada punto de recepción de la simulación 1 respecto a las medidas reales

Número de receptor	Error Absoluto (dBm)	Error Relativo (%)
1	0.08	0.5
2	0.57	3.35
3	4.18	59.71
4	1.93	7.72
5	0.43	1.34
6	0.2	5
7	2.3	6.57
8	0.51	1.27
9	2.33	6.29
10	13.2	24.90
11	0.76	5.42
12	2.72	9.06
13	4.92	12
14	0.14	1.07
15	1.28	3.28
16	1.53	3.47
17	0.17	0.51
18	3.55	8.65
19	2.49	15.56
20	2.95	6.02
21	0.01	0.035

³⁷ El error absoluto da una idea de que tan aproximado es un pronóstico respecto a valores reales.

³⁸ El error relativo es un índice de la precisión del pronóstico respecto a valores reales.



CAPITULO 4

El error medio relativo³⁹ se puede calcular mediante la ecuación 4.6.

$$EMR = \frac{\sum_{i=1}^n E_{Relativo}}{n} \tag{4.6}$$

Por lo tanto, se tiene: $EMR = 8.65 \%$.

El error cuadrático medio⁴⁰ se puede calcular mediante la ecuación 4.7.

$$ECM = \frac{\sum_{i=1}^n (Prx_{Medida} - Prx_{Estimada})^2}{n} \tag{4.7}$$

Por lo tanto, se tiene: $ECM = 12.89$.

La desviación estándar del error se puede calcular mediante la ecuación 4.8.

$$DEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Prx_{Medida} - Prx_{Estimada})^2}{n-1}} \tag{4.8}$$

Por lo tanto, se tiene: $DEE = 3.679$.

Cabe resaltar que en la ecuación 4.8 $Prx_{Estimada}$ no representa la media de las estimaciones o valores estimados de potencia de recepción, ya que la desviación estándar de error no se mide respecto de la media, sino que se promedian las desviaciones de las estimaciones de potencia respecto a las medidas reales.

Según los resultados obtenidos, la herramienta posee un porcentaje muy bajo de error en el cálculo de la predicción de la propagación y cobertura comparado con las medidas reales, además se puede afirmar según los cálculos de error cuadrático medio y la desviación estándar de error, que existe una tendencia a que los errores en la predicción de la propagación y cobertura usando la técnica de trazado de rayos sean muy bajos.

En las Figuras 4.2 y 4.3 se muestran los resultados estadísticos obtenidos, teniendo en cuenta la potencia de recepción en cada uno de los puntos seleccionados para la simulación 1 y las medidas reales en los mismos, para comparar las medidas y estimar el grado de precisión que posee la herramienta

³⁹ El error medio relativo identifica el porcentaje de variación que existe entre pronóstico y los valores reales en promedio.

⁴⁰ El error cuadrático medio proporciona una estimación de la cantidad de error que se está cometiendo en el pronóstico respecto a los valores reales.



CAPITULO 4

Wireless InSite® en la predicción de la propagación y cobertura de un sistema Wi-Fi en interiores aplicando la técnica de trazado de rayos.

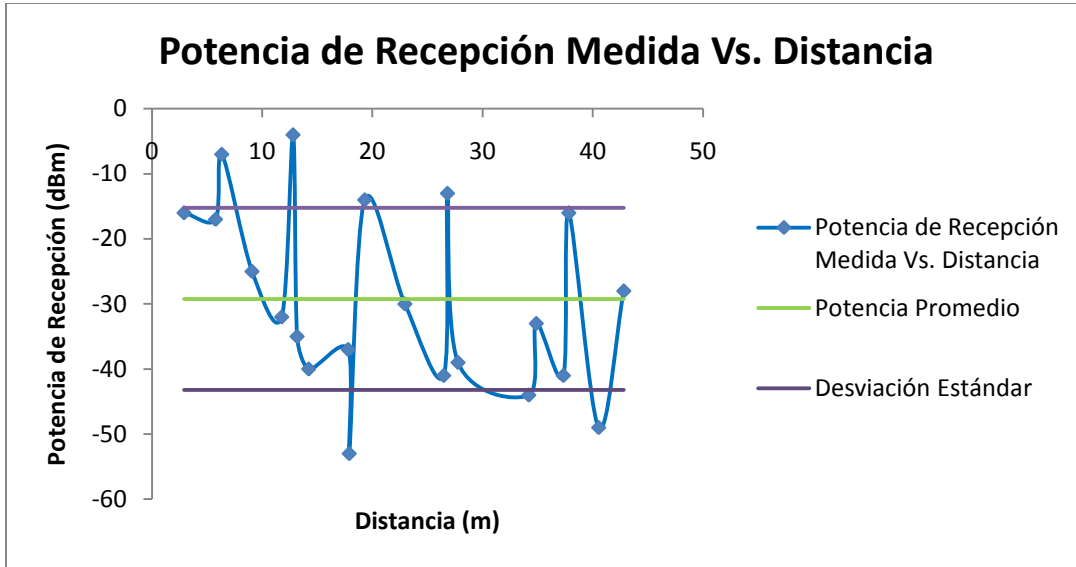


Figura 4. 2 Desviación estándar y potencia de recepción promedio medida

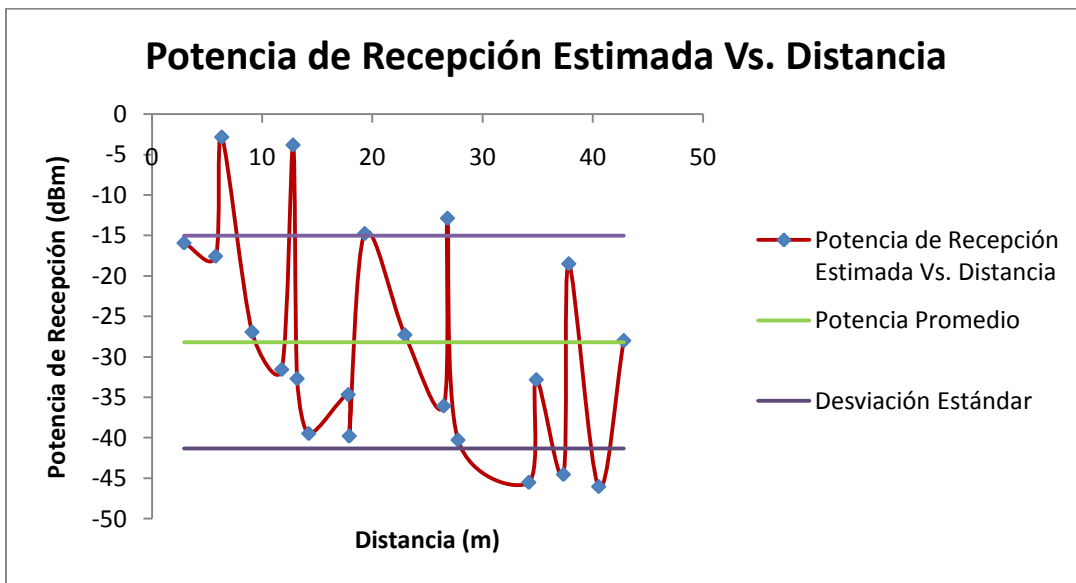


Figura 4. 3 Desviación estándar y potencia de recepción promedio estimada

En la Figura 4.4 se muestra gráficamente la superposición de los resultados arrojados por la herramienta de predicción de propagación y cobertura Wireless InSite® y las medidas reales realizadas con la plataforma inalámbrica

CAPITULO 4

PowerStation2® mostradas en la Tabla 4.4 respecto a la distancia entre la antena transmisora y antena receptora.

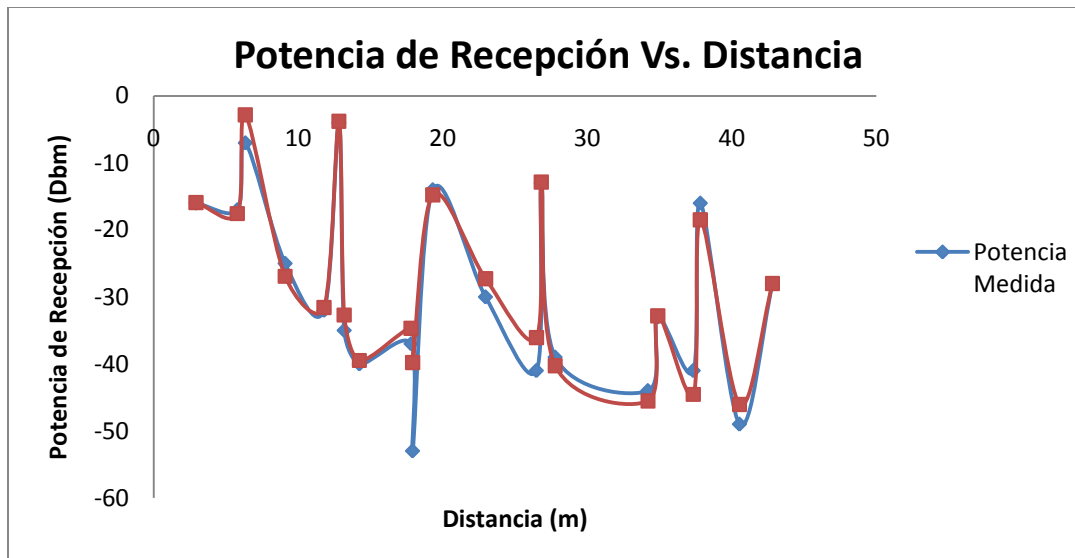


Figura 4. 4 Potencia de recepción medida y estimada

En la Figura 4.5 se muestran los puntos de referencia en la toma de las medidas reales y en la simulación 2.

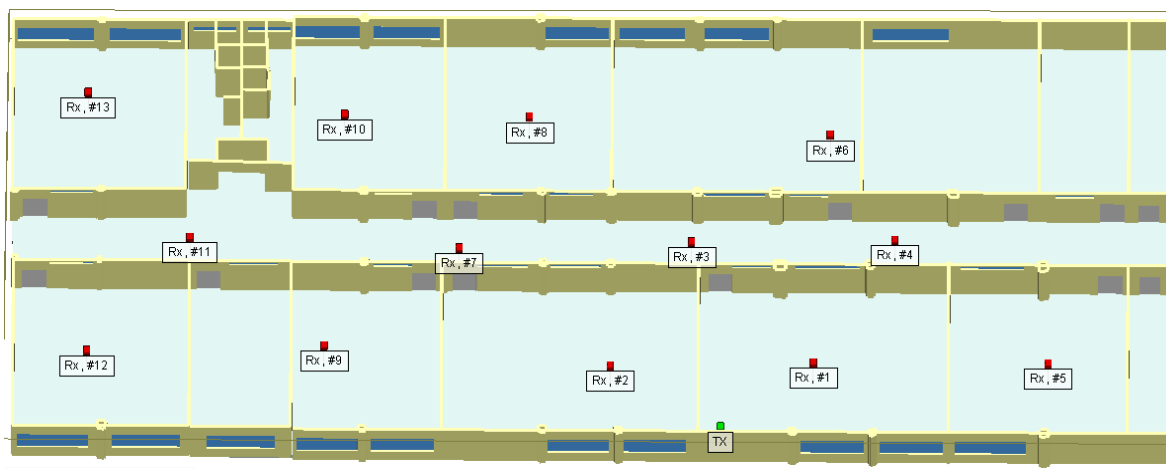


Figura 4. 5 Ubicación puntual de receptores en la simulación 2

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados obtenidos a partir de la predicción realizada con la herramienta de simulación y las medidas reales, teniendo en cuenta la distancia lineal de separación entre cada punto de recepción y el transmisor.



CAPITULO 4

Tabla 4. 3 Potencia de recepción estimada en la simulación y medidas reales en los puntos de referencia

Punto de Recepción	Distancia (m)	Potencia de Rx Medida (dBm)	Potencia de Rx Estimada (dBm)	Ubicación en la grilla
1	4.73	-23	-17.72	611
2	5.52	-14	-11.01	684
3	7.73	-33	-20.63	1602
4	8.78	-29	-24.58	1433
5	13.95	-28	-22.92	721
6	14.59	-63	-53.39	2429
7	15.76	-34	-29.11	1494
8	15.84	-42	-44.62	2499
9	15.86	-27	-24.59	391
10	19.18	-102	-137.61	2393
11	22.19	-40	-36.44	1562
12	24.96	-117	-144.57	644
13	27.66	-102	-156.23	2556

Para la simulación 2 que presenta la cobertura no favorable, se realizan los cálculos estadísticos (media, varianza, desviación estándar, el error medio relativo y la desviación estándar del error) con respecto a la potencia de recepción, a partir de las ecuaciones presentadas previamente para la simulación 1.

En la Tabla 4.4 se presentan los cálculos estadísticos correspondientes a la estimación realizada por la herramienta de predicción y a las medidas reales con referencia a la simulación 2 haciendo uso de las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3.

Tabla 4. 4 Resultados estadísticos para la simulación 2 con respecto a las medidas estimadas y reales

Potencia de recepción	Potencia promedio (dBm)	Varianza (σ^2)	Desviación Estándar (σ)
Estimada	-55.64	2799.98	52
Medida	-50.307	1187.73	34



CAPITULO 4

En la Tabla 4.5 se presentan los cálculos del error absoluto y el error relativo haciendo uso de las ecuaciones 4.4 y 4.5 para cada uno de los puntos que se tuvieron en cuenta en la comparación de los resultados de la simulación 2 con las medidas reales.

Tabla 4. 5 Medida de error para cada punto de recepción de la simulación 2 respecto a las medidas reales

Número de Receptor	Error Absoluto (dBm)	Error Relativo (%)
1	5.28	22.95
2	2.99	21.35
3	12.37	37.48
4	4.42	15.24
5	5.08	18.14
6	9.61	15.25
7	4.89	14.38
8	2.62	6.23
9	2.41	8.92
10	35.61	34.91
11	3.56	8.9
12	27.57	23.56
13	54.23	53.16

Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 4.5 y haciendo uso de la ecuación 4.6 se calcula el error medio relativo

Por lo tanto se tiene: $EMR = 21.57 \%$.

La desviación estándar del error se calcula utilizando la ecuación 4.8, para lo cual se tiene:

$DEE = 3.77$.

A continuación se muestra en las Figuras 4.6 y 4.7, los resultados estadísticos obtenidos teniendo en cuenta la potencia de recepción de cada punto seleccionado para la simulación 2 y las medidas reales.

CAPITULO 4

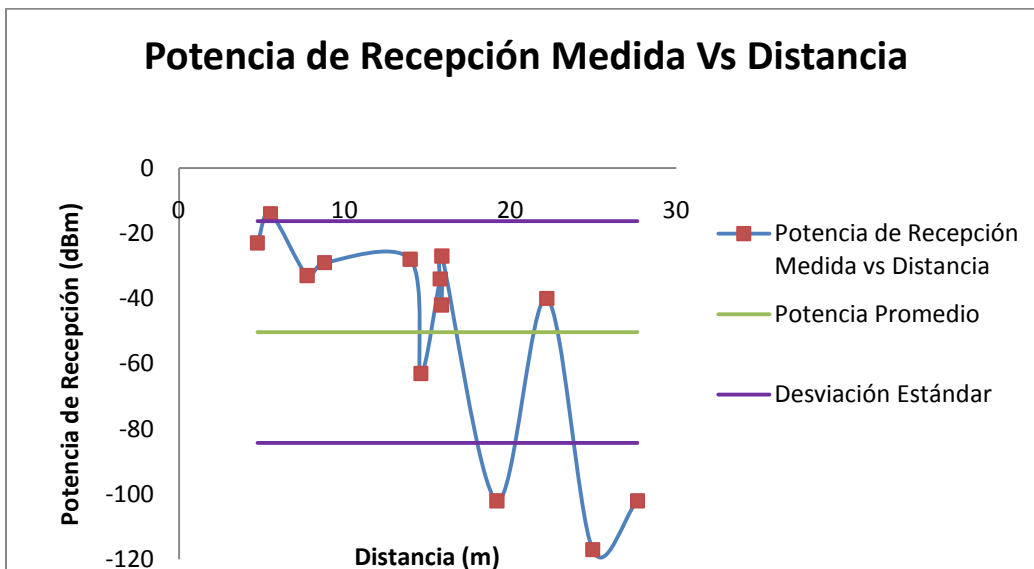


Figura 4. 6 Desviación estándar y potencia de recepción medida en la simulación 2

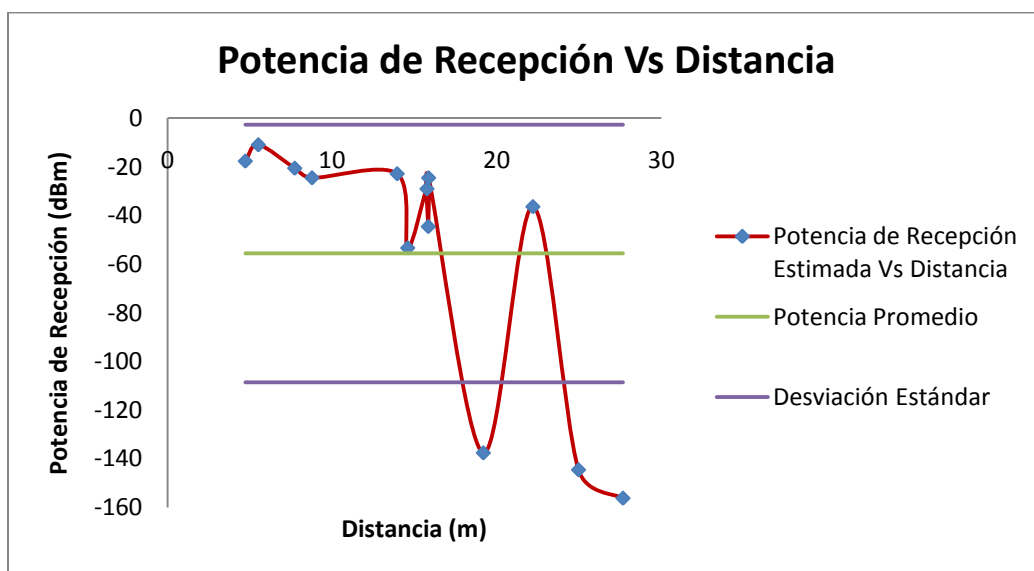


Figura 4. 7 Desviación estándar y potencia promedio de recepción estimada en la simulación 2

En la Figura 4.8 se muestra gráficamente la superposición de los resultados arrojados por la herramienta de predicción propagación y cobertura Wireless InSite® y las medidas reales realizadas con la plataforma inalámbrica PowerStation



CAPITULO 4

2^o mostrados en la Tabla 4.3 respecto a la distancia lineal entre la antena de transmisión y cada punto de recepción.

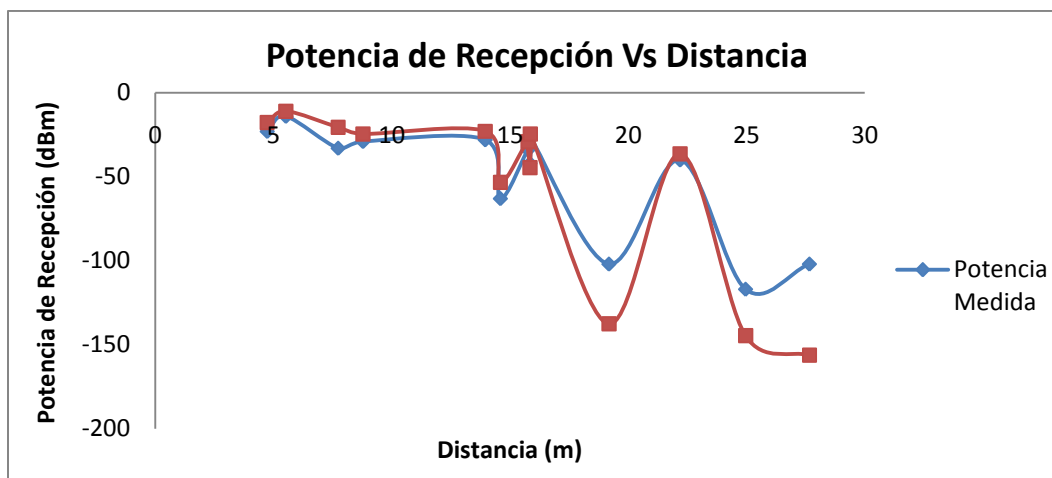


Figura 4. 8 Potencia de recepción medida y estimada para la simulación 2

Los resultados reales y de simulación obtenidos son muy semejantes, lo que denota un alto grado de precisión en la predicción de la propagación y cobertura de la herramienta Wireless InSite[®].

De esta manera se evalúa la precisión que tiene el uso de la técnica de trazado de rayos en la predicción de la propagación y cobertura de un sistema Wi-Fi en un escenario de interiores usando la herramienta Wireless InSite[®].

4.3 CARACTERIZACIÓN DEL CANAL

Una vez demostrada la alta precisión que posee la herramienta de predicción de propagación y cobertura Wireless InSite[®], se puede realizar un análisis más profundo del canal de comunicación gracias a las características que ofrece el uso de la técnica de trazado de rayos.

En la Figura 4.9 se muestra la gráfica de potencia recibida contra distancia en todos los puntos de la grilla, donde se nota claramente que a medida que el terminal receptor se aleja del terminal transmisor, la señal se atenúa y que a una misma distancia se presentan diferentes niveles de potencia de recepción sobre el canal.

CAPITULO 4

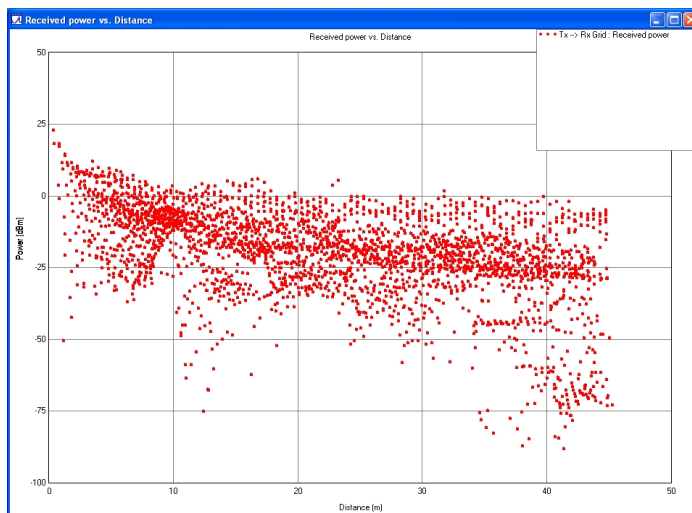


Figura 4. 9 Potencia de recepción en todos los puntos de la grilla

En la Figura 4.10 se muestra la Función de Densidad de Probabilidad (PDF, *Probability Density Function*)⁴¹ de potencia recibida en el escenario de interiores, en donde se puede notar que el comportamiento probable de rango de potencias que se pueden tener se encuentra entre los 9.64 dBm y -48.36 dBm, en donde el pico más alto se encuentra ubicado en -18.36 dBm el cual representa el nivel de potencia de recepción que tiene la mayor probabilidad de ocurrencia.

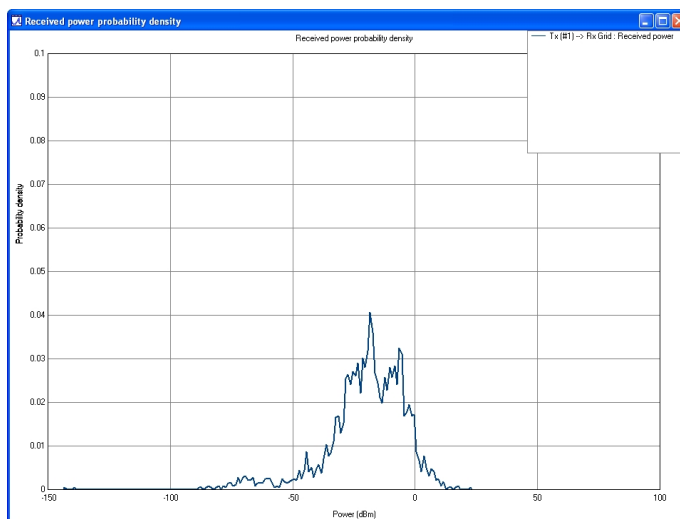


Figura 4. 10 Función de densidad de probabilidad de la potencia recibida

⁴¹ La función densidad de probabilidad se utiliza con el propósito de conocer cómo se distribuyen las probabilidades de un suceso o un evento, en relación al resultado del suceso.

CAPITULO 4

Para realizar un estudio sobre la naturaleza de los desvanecimientos producidos sobre el escenario de interiores, se analiza el nivel de potencia sobre tres rutas de puntos de recepción. La primera ruta, corresponde a 80 puntos de recepción que se encuentran en línea de vista con el terminal transmisor. La segunda ruta corresponde a 80 puntos de recepción que no se encuentran en línea de vista con el terminal transmisor y la tercera ruta, la cual intercepta las otras dos rutas, corresponde a 34 puntos de recepción en donde se alterna lugares en línea de vista y no línea de vista con el terminal transmisor. En la Figura 4.11 se muestran cada una de las rutas de estudio.

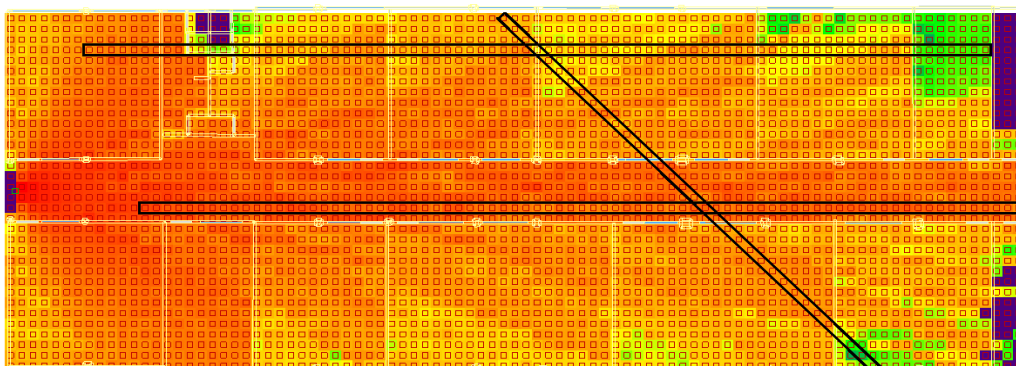


Figura 4. 11 Rutas de puntos de recepción

En las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 se muestran las gráficas de potencia de recepción contra distancia para cada una de las rutas. Se puede apreciar que las rutas horizontales presentan desvanecimientos rápidos más pronunciados.

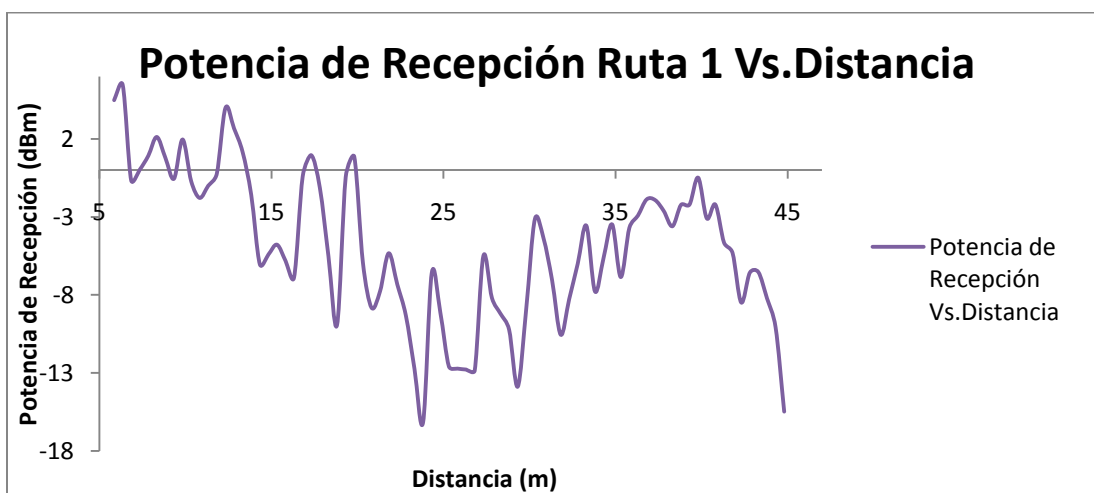


Figura 4. 12 Potencia de recepción contra distancia sobre la ruta 1 de puntos de recepción en línea de vista



CAPITULO 4

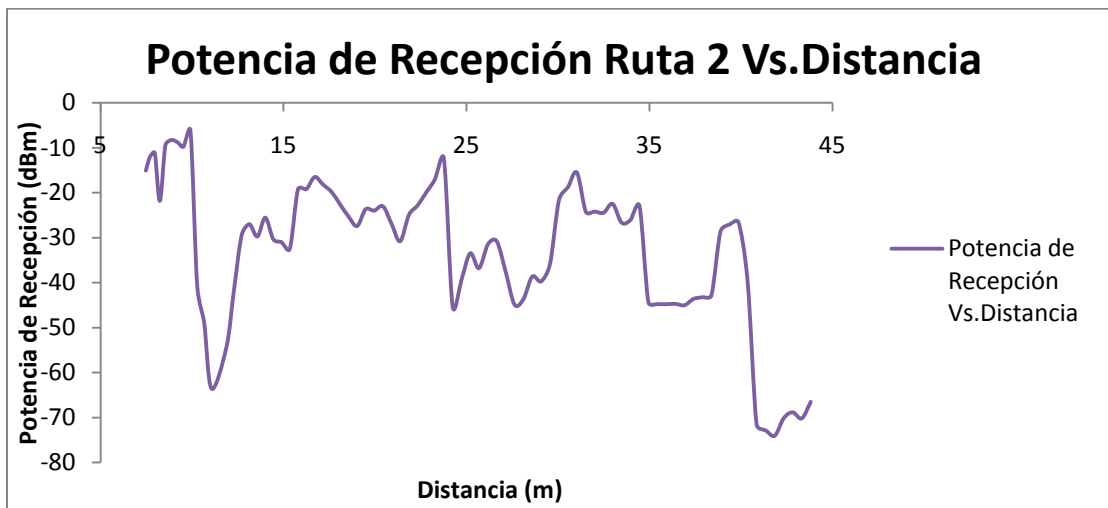


Figura 4. 13 Potencia de recepción contra distancia sobre la ruta 2 de puntos de recepción sin línea de vista

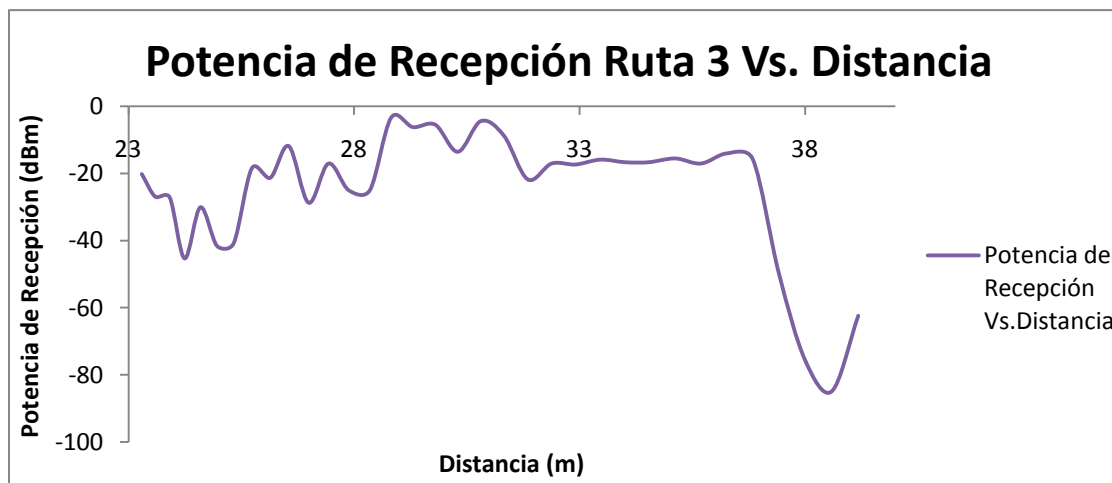


Figura 4. 14 Potencia de recepción contra distancia sobre la ruta 3 de puntos de recepción con línea de vista y sin línea de vista

En las rutas 1 y 2, se observan desvanecimientos rápidos, desvanecimientos producidos por la multitrayectoria debido a las contribuciones de las diferentes señales que llegan al terminal receptor en diferentes instantes de tiempo y con diferentes niveles de amplitud y fase; en la ruta 3 predominan los desvanecimientos rápidos la inicio de la ruta, aunque se observan sectores en la mitad del trayecto donde se presenta desvanecimiento lento, originados por la



CAPITULO 4

interacción de la señal con los objetos de gran tamaño que se encuentran en el canal de propagación.

Al final de cada una de las rutas, en los lugares más alejados, se presentan desvanecimientos profundos. Según los resultados observados, se puede deducir entonces que en el escenario de interiores predomina la presencia de desvanecimientos rápidos.

La herramienta de predicción de propagación y cobertura Wireless InSite® presenta un modulo de análisis del perfil de retardo temporal de cada una de las contribuciones de los puntos de recepción en la grilla, dichos módulos se analizan a continuación.

4.3.1 Dispersión de Retardo

En la Figura 4.15 se muestra la dispersión de retardo calculado por la herramienta para cada uno de los puntos de la grilla.

Para un análisis más general, se tomaron los resultados de la dispersión de retardo estimados por la herramienta de los mismos puntos usados en las medidas de campo reales que se muestran en la Figura 4.1, los cuales se muestran en la Tabla 4.6.

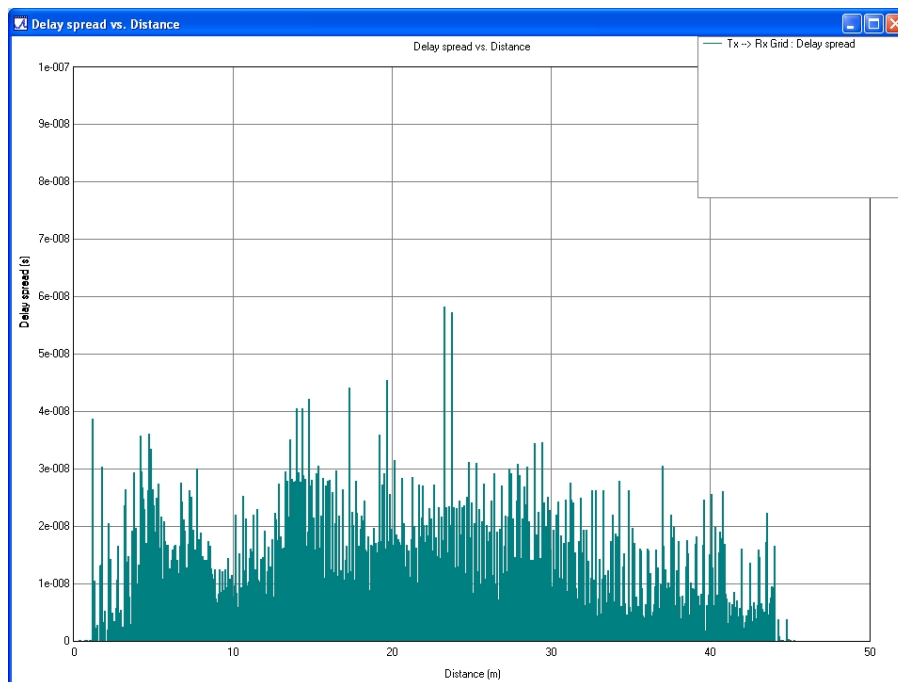


Figura 4. 15 Dispersión de Retardo contra distancia



CAPITULO 4

Tabla 4. 6 Potencia de recepción estimada y dispersión de retardo en los puntos de medición

Número de receptor	Distancia (m)	Potencia de Rx Estimada (dBm)	Dispersión de Retardo (ns)	Ubicación en la grilla
1	2.91	-15.92	4.88	1004
2	5.77	-17.57	9.08	552
3	6.33	-2.82	1.66	1652
4	9.08	-26.93	6.68	2202
5	11.77	-31.57	12.6	2570
6	12.8	-3.8	2.42	1483
7	13.17	-32.7	12.8	389
8	14.22	-39.49	20	2666
9	17.8	-34.67	13.1	3036
10	17.9	-39.8	13	2674
11	19.3	-14.76	2.77	1587
12	22.95	-27.28	1.28	2049
13	26.47	-36.08	17.8	143
14	26.81	-12.86	2.03	1420
15	27.77	-40.28	1.46	237
16	34.19	-45.53	16	2526
17	34.87	-32.83	3.37	1163
18	37.33	-44.55	5.8	439
19	37.82	-18.49	1.55	1351
20	40.53	-46.05	6.4	2993
21	42.81	-27.99	1.26	1816

En la Figura 4.16 se muestra la gráfica de dispersión de retardo contra distancia, en donde se presenta un comportamiento errático respecto a la distancia de las antenas, con lo cual no se está en capacidad de concluir alguna relación entre estas dos variables, esto debido a que el canal al no ser homogéneo, presenta obstáculos que afectan de manera diferente la señal en áreas específicas en el escenario de interiores.



CAPITULO 4

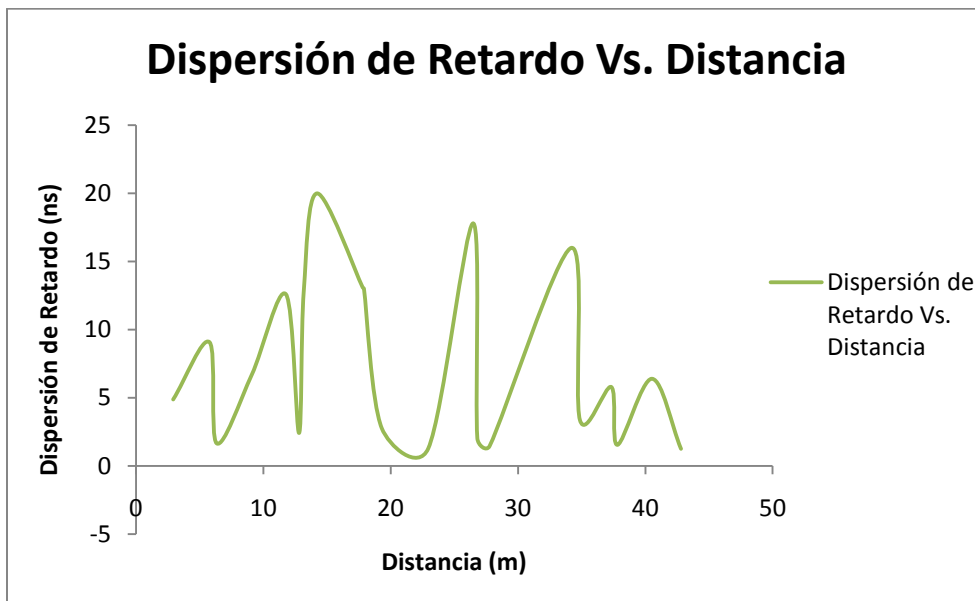


Figura 4. 16 Dispersión de retardo

Para una comprensión más detallada de la naturaleza de los retardos que presenta la señal sobre el canal de comunicación del escenario de interiores en puntos específicos, se procede a analizar el perfil de potencia recibida⁴² de cada una de las contribuciones que presenta la señal sobre la antena receptora en 5 de los 21 puntos elegidos al azar sobre los que se realizaron las medidas reales. Los puntos elegidos sobre la grilla son los mostrados en la Tabla 4.7.

Tabla 4. 7 Número de contribuciones de los receptores elegidos

Número de receptor	Ubicación en la grilla	Número de contribuciones	Línea de vista LOS
5	2570	25	No
11	1587	25	Si
15	237	25	No
20	2993	12	No
21	1816	25	Si

La columna número de contribuciones se refiere a la cantidad de rayos que llegan al terminal receptor en la simulación.

⁴² El perfil de potencia recibida en la caracterización del retardo en canales multitrayectoria mide los niveles de potencia recibida en función del retardo como una colección de impulsos que definen los retardos multitrayectoria.



CAPITULO 4

Se puede notar en la Tabla 4.7 que se eligieron 3 puntos de recepción que no se encontraban en línea de vista, y 2 que si lo estaban. En la Figura 4.17 se muestra la gráfica del perfil de potencia retardo⁴³, en la que se aprecia el tiempo de llegada de cada una de las contribuciones en los 5 terminales receptores.

En general se evidencia que los retardos de cada una de las contribuciones de la señal son más dispersivos para situaciones en las que no se presentan línea de vista mientras que en los casos en los que se presenta línea de vista, hay una dispersión menor de los valores, además el retardo en promedio de la señal aumenta respecto a la distancia del enlace.

Por lo tanto, se puede afirmar que la dispersión de retardo en escenarios de interiores depende en gran medida de las obstrucciones que encuentre la señal en la propagación por el canal.

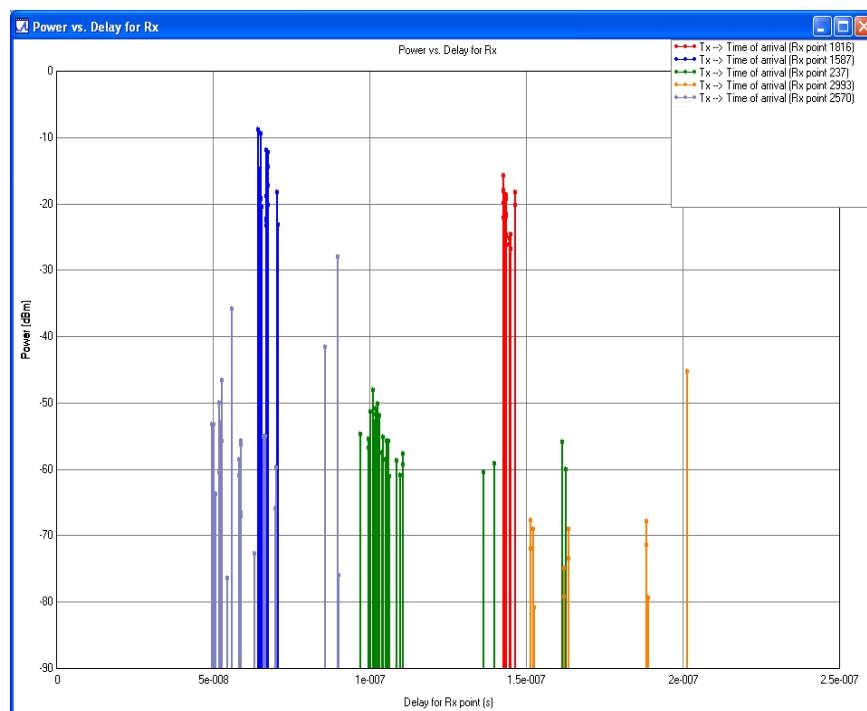


Figura 4. 17 Perfil de potencia retardo

⁴³ El perfil potencia retardo representa las componentes de potencia que llegan al receptor y su valor en función del retardo sufrido. Dicho retardo se expresa como el retardo respecto a la primera componente que alcanza el receptor.



CAPITULO 4

4.3.2 Ancho de Banda de Coherencia

El ancho de banda de coherencia, que es una relación que se deriva de la dispersión de retardo, es una medida estadística de rango de frecuencias sobre las cuales el canal puede ser considerado plano en frecuencia⁴⁴, por lo tanto dos señales con un frecuencia de separación mayor que el ancho de banda de coherencia son afectadas de manera diferente por el canal. El ancho de banda de coherencia viene dado por la ecuación 4.9 [8].

$$B_c = \frac{1}{2\pi\sigma_t} \quad (4.9)$$

Donde:

- σ_t : Dispersión de retardo (ns).

Se pueden clasificar dos tipos de canales según el ancho de banda de coherencia: Cuando el ancho de banda de coherencia del canal es mayor que el ancho de banda de la señal, se dice que el canal presenta un comportamiento plano en frecuencia y no presenta distorsión temporal debido a que el ensanchamiento temporal producido por las diferentes contribuciones es menor que el tiempo de duración de un símbolo de la señal transmitida [37].

Cuando el ancho de banda de coherencia del canal es menor que el ancho de banda de la señal, el comportamiento del canal dentro del ancho de banda presenta grandes variaciones, entonces se dice que dicho canal presenta selectividad en frecuencia, presentando retardos debido a componentes multitrayecto con valores comparables al tiempo de duración de un símbolo [37].

En la Tabla 4.8 se muestra el ancho de banda de coherencia calculado para los mismos puntos usados en las medidas reales que se muestran en la Figura 4.1.

En la Figura 4.18 se muestra claramente la relación de proporcionalidad inversa que existe entre la dispersión de retardo y el ancho de banda de coherencia.

En la Figura 4.19 se muestra la relación entre el ancho de banda de coherencia y la distancia de los terminales receptores.

⁴⁴ Un canal se considera plano en frecuencia cuando todos los componentes de frecuencia que pasan a través de dicho canal tienen una alta correlación en amplitud, es decir las componentes espectrales que conforman la señal pasan a través de ella con una ganancia aproximadamente igual y en fase lineal.



CAPITULO 4

Tabla 4. 8 Ancho de banda de coherencia calculado en los puntos de la campaña de medición

Número de receptor	Distancia (m)	Dispersión de Retardo (ns)	Ancho de Banda de Coherencia (MHz)
1	2.91	4.88	32.61
2	5.77	9.08	17.52
3	6.33	1.66	95.87
4	9.08	6.68	23.82
5	11.77	12.6	12.63
6	12.8	2.42	65.76
7	13.17	12.8	12.43
8	14.22	20	7.95
9	17.8	13.1	12.14
10	17.9	13	12.24
11	19.3	2.77	57.45
12	22.95	1.28	124.33
13	26.47	17.8	8.94
14	26.81	2.03	78.40
15	27.77	1.46	109.01
16	34.19	16	9.94
17	34.87	3.37	47.22
18	37.33	5.8	27.44
19	37.82	1.55	102.68
20	40.53	6.4	24.86
21	42.81	1.26	126.31

Teniendo en cuenta que se trabajó con el estándar IEEE 802.11b, el cual presenta un ancho de banda de canal de 22 MHz, usando la ecuación 4.9 se encuentra la dispersión de retardo umbral a la cual el canal se considera plano en frecuencia.

Por lo tanto, en el escenario de interiores se tiene que para valores de dispersión de retardo superiores a 7.23 ns el canal presenta selectividad en frecuencia.

CAPITULO 4

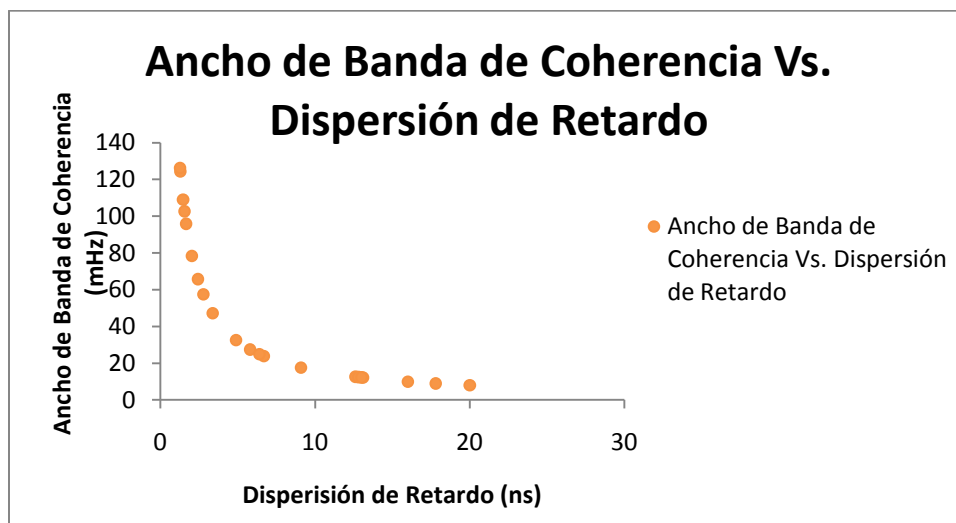


Figura 4. 18 Ancho de banda de coherencia contra dispersión de retardo

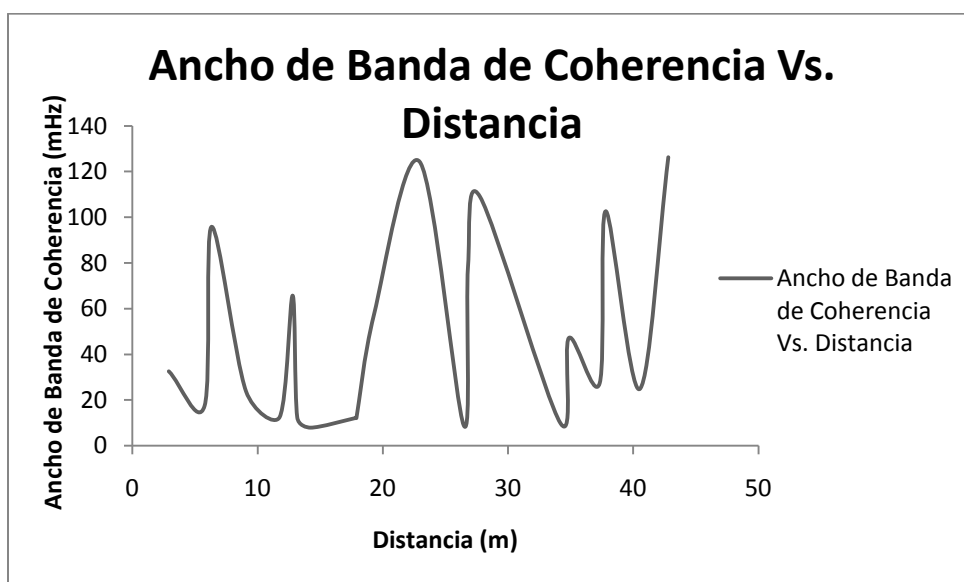


Figura 4. 19 Ancho de banda de coherencia contra distancia

Se puede apreciar claramente en la Tabla 4.8 que el ancho de banda de coherencia resulta ser mayor para los casos en que se presenta línea de vista, por lo tanto se puede concluir que se tiene una mayor inmunidad a presentar desvanecimientos selectivos en frecuencia cuando existe línea de vista.

En la Figura 4.20 se muestra los puntos en los cuales se presenta desvanecimiento selectivo en frecuencia, en donde se aprecia claramente que



CAPITULO 4

ninguno de los puntos que presentan línea de vista directa con el terminal transmisor, presenta este fenómeno.

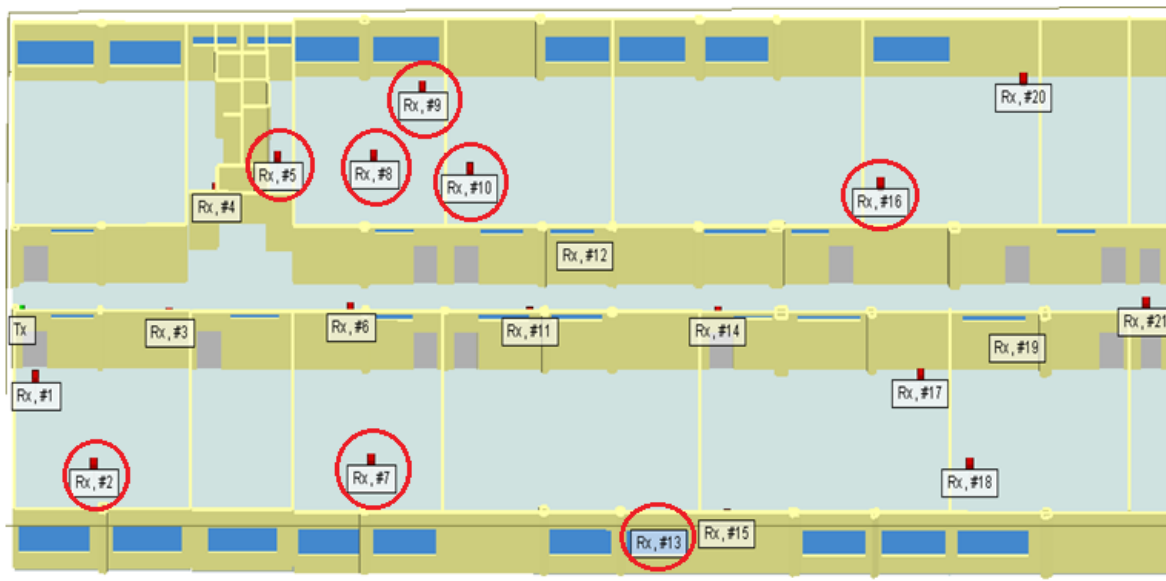


Figura 4. 20 Desvanecimiento selectivo en frecuencia



5

CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS DE GRADO

5.1 INTRODUCCIÓN

El trabajo de grado presentado se centró en el análisis de la cobertura de un sistema *Wi-Fi* operando bajo las especificaciones del estándar IEEE 802.11b en un escenario de interiores, en donde se hizo uso de una herramienta software que implementaba la técnica de trazado de rayos como método de predicción y haciendo uso de un modelo de propagación, se realizó una simulación con la herramienta de predicción de cobertura Wireless InSite®.

Se definió la ubicación del terminal transmisor dentro del escenario de interiores en donde se presentaba la mejor cobertura del escenario, y se compararon los resultados obtenidos en la simulación por medio de análisis estadísticos con medidas reales haciendo uso de un par de plataformas inalámbricas Ubiquiti PowerStation2® verificando el alto grado de precisión que ofrece la técnica de trazado de rayos y los modelos de propagación implementados en la herramienta software en la predicción de la cobertura en escenarios de interiores.

Además se realizó un estudio del canal de comunicación, en donde se analizaron los retardos y desvanecimientos que sufría la señal en su propagación por el canal.

En este capítulo se presentan las conclusiones y las recomendaciones sobre futuros trabajos de grado, los cuales darán continuidad al estudio de los sistemas inalámbricos para comunicación de datos en escenarios interiores y la estimación de cobertura.



CAPITULO 5

5.2 CONCLUSIONES

- La técnica de trazado de rayos y el modelo de propagación completo 3D utilizado por la herramienta de predicción de propagación Wireless InSite®, estima con alto grado de precisión la cobertura que presenta un sistema *Wi-Fi* en escenarios interiores.
- El uso de la técnica de trazado de rayos no se limita a estimar los niveles de potencia dentro de un escenario o determinar la cobertura de un sistema, también permite realizar un estudio del canal de comunicaciones.
- En el escenario de interiores existen desvanecimientos rápidos; en regiones donde no hay línea de vista con el terminal transmisor el desvanecimiento rápido se combina con el desvanecimiento lento.
- Los terminales receptores que presentan línea de vista con el terminal transmisor presentan menor dispersión de retardo que los que presentan línea de vista, ya que los rayos alcanzan al terminal receptor con una diferencia de tiempo mínima, lo que brinda una mayor inmunidad a generar interferencia inter símbolos (ISI).
- Existen puntos dentro del escenario de interiores en donde existen desvanecimientos selectivos en frecuencia, en especial aquellos puntos donde no existe línea de vista con el terminal transmisor.
- El análisis a nivel de simulación realizado en este trabajo de grado resulta útil como una etapa inicial en el proceso de planificación de sistemas *Wi-Fi* en interiores, permitiendo una reducción en el tiempo de diseño e implementación que conlleva a disminuir los costos de despliegue operación y mantenimiento de estos sistemas.
- La diferencia existente entre las medidas estimadas y las medidas reales se debe a la limitación de la herramienta de predicción en el modelado de personas y algunos elementos de la infraestructura tales como escaleras y columnas, así como la dificultad en la importación de objetos que hacen parte del escenario tales como asientos, mesas, armarios y equipos en general, los cuales tienen influencia sobre la propagación y las pérdidas de las señales electromagnéticas.



CAPITULO 5

5.3 FUTUROS TRABAJOS PROPUESTOS

Los resultados presentados en este trabajo de grado permiten plantear algunos futuros trabajos de investigación que contribuyan al desarrollo de sistemas de radiofrecuencia en escenarios interiores, para ello se propone:

- Realizar la evaluación de desempeño de sistemas *Wi-Fi* desplegados en escenarios interiores con el fin de optimizar la calidad de la transmisión de datos.
- Estudiar las estrategias y procedimientos para la integración de sistemas *Wi-Fi* con la red móvil celular haciendo uso de la arquitectura de Servicios del Subsistema Multimedia IP (IMS, *IP Multimedia Subsystem*).
- Realizar análisis de cobertura de sistemas *Wi-Fi* sobre canales MIMO utilizando el estándar IEEE802.11n, realizando comparaciones con los resultados presentados en este trabajo de grado haciendo uso de la técnica de trazado de rayos.
- Estudiar el grado de precisión que tiene el uso de la técnica de trazado de rayos en la predicción de la cobertura en escenarios diferentes al de interiores y en sistemas con características diferentes.
- Estudiar, diseñar, implementar y analizar el despliegue de sistemas *Wi-Fi* que brinden total cobertura a todas las dependencias de la Universidad del Cauca en entornos de interiores y exteriores haciendo uso de la herramienta de predicción de propagación Wireless InSite®.
- Analizar la cobertura en escenarios interiores utilizando un sistema de radiofrecuencia que opere en la banda de frecuencia de 60GHz, buscando optimizar el alcance del sistema para la utilización de aplicaciones que requieran de tasas de transmisión de datos del orden de los gigabits y que brinde compatibilidad con los sistemas *Wi-Fi* que operan hoy en día en las bandas de frecuencia de operación de 2.4 GHz y 5 GHz.
- Estimar el grado de precisión en la predicción de la cobertura al implementar algoritmos de aceleración de trazado de rayos para la reducción de la carga computacional y tiempos de procesamiento asociados al análisis de la cobertura.



CAPITULO 5

- Analizar otros modelos de propagación, métodos de predicción y realizar estudios de combinación de métodos de predicción
- Crear una herramienta software que implemente la técnica de trazado de rayos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Martínez, S. Vidal, J. Sosa; “Análisis de propagación en interiores en la banda de 2.4GHz, para el diseño de cobertura de la red IEEE 802.11b, g de Esime Zacatengo”; Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. – Febrero 2006
- [2] E. Castellanos, J. Talero, J. Rugeles, H. Ortega; “Análisis de Propagación Electromagnética en Espacios Cerrados: Herramienta Software en Matlab® para Predicción y Simulación”, Grupo RadioGIS; Universidad Industrial de Santander – Abril 2005.
- [3] Y. Carreño, A. García, H. Ortega, D. Rosas; “Predicción de perdidas por propagación por medio del modelo andino UIS®” Universidad Industrial de Santander, Colombia; Artículo publicado en Revista GTI, volumen. 4, número 8 año 2005.
- [4] A. Goldsmith; “Wireless Communications”; Segunda Edición Universidad de Standford – 2005.
- [5] J M. Miranda, J. L. Sebastián, M Sierra; “Ingeniería de Microondas: técnicas experimentales”; Editorial Prentice Hall.
- [6] N. Fernández; Tesis doctoral; “Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo”; Universidad de Oviedo – Marzo 2006.
- [7] S. Rackley; “Wireless Networking Technology”; Primera Edición – 2007
- [8] J. M. Gilson “The Next Generation of Wireless LAN Emerges with 802.11n”, Communications Technology Lab. Intel Corporation – Agosto 2004.
- [9] O. Sallent, J. L. Valenzuela; “Principios de Comunicaciones Móviles”; Editorial UPC.
- [10] M. Gorricho, J. L. Gorricho; “Comunicaciones Móviles”; Editorial UPC.
- [11] Rec. ITU-T P.310-9; “Definición de términos relativos a la propagación en medios no ionizados”.
- [12] J. Rábanos; “Comunicaciones Móviles”; segunda edición; Editorial cetro de estudio Ramo Areces.



JAVIER ALBERTO LUNA – SANTIAGO ANDRÉS AGREDO

- [13] E. Catellanos, J. B. Talero, J. Rugeles; “Análisis de propagación electromagnética en espacios cerrados: herramienta software en matlab para predicción y simulación”; Grupo RadioGIS, Universidad Industrial de Santander – Abril 2005.
- [14] C. G. Victorino; Tesis de maestría; “Concatenación de códigos convolucionales de canal con códigos espacio-tiempo y espacio-frecuencia”; Centro de investigación científica y de educación superior de Ensenada – Octubre 2008.
- [15] J. L. Camargo, S. Hornillo; Proyecto de fin de carrera; “Modelo de cobertura para redes inalámbricas de interiores”; Universidad de Sevilla – Mayo 2009
- [16] M. R. Arahal, M. Berenguel, F. Rodriguez; “Técnicas de predicción con aplicaciones en ingeniería”; Universidad de Sevilla
- [17] D. Luis, A. Tabernilla, F. P. Costoya; Trabajo de fin de carrera; “Sistema de localización en interiores”; Universidad Politécnica de Madrid
- [18] J. Gutiérrez, F. Las Heras, J. A. Martínez; Tesis Doctoral; “Evaluación de niveles de campo electromagnético en entornos rurales/urbanos mediante técnicas de procesamiento geométrico y método MECA (modified Equivalent Current Approximation)”; Universidad de Oviedo 2010
- [19] F. Carreño, M. A. Revilla, J. M. Esquerro, O. Gómez; “Experiencias de óptica Física”; Universidad Complutense de Madrid; Editorial Complutense, S. A.
- [20] M. Sagrario Millán, J. Escofet, E. Pérez; “Óptica Geométrica”; Editorial Ariel, S. A.
- [21] V. Campillo, J. M. Molina; Proyecto de Fin de Carrera; “Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD”; Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cartagena - Junio 2008.
- [22] J. M. Molina, L. J. Llácer; Proyecto de Fin de Carrera; “Análisis Teórico-Experimental del Canal Radio en Microceldas y Entornos Especiales para Sistemas de Comunicaciones Móviles de Banda Ancha”; Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena – 2004
- [23] N. Beltrán, S. Dibán; Proyecto de fin de carrera; “Aplicación del Modelo ray-tracing para determinar el Comportamiento de la Propagación al Interior de



Edificios”; Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

[24] D. Campos; Proyecto de fin de carrera; “Cobertura Dentro de Construcciones para Comunicaciones Personales Móviles Vía Satélite”; Departamento de Ingeniería Electrónica; Universidad de las Américas Puebla.

[25] N. Beltrán, S. Dibán; “Aplicación del Modelo Ray-Tracing para Determinar el Comportamiento de la Propagación al Interior de Edificios”; Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile;

[26] N. A. El.Gader; “Outdoor Propagation Prediction an Measurement Point to Point for Wireless LAN Application”; Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Malaysia; Junio de 2008.

[27] S. Flores, N. Cardona; Tesis Doctoral; “Caracterización del Canal Radio Móvil en el Interior de Edificios con Múltiples Plantas mediante Técnicas de Lanzado de Rayos”; Universidad Politécnica de Valencia.

[28] C. Pérez, J. M. Zamanillo, A. Casanueva; “Sistemas de Telecomunicación”; Universidad de Cantabria;

[29] D. Avilez, O. A. Ortega, C, L, Ortega; Proyecto de fin de carrera; “Diseño del Enlace para Redes Basadas en el Estándar IEEE 802.16”; Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional; México DF – 2008.

[30] J.Schuster, R. Luebbers; “Hybrid SBR/GTD radio propagation model for site specific predictions in an urban environment”; 12th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics; Monterey, California; vol1, pp. 84-92;1996.

[31] J. Schuster, R. Luebbers; "Comparison of Site-Specific Radio Propagation Path Loss Predictions to Measurements in an Urban Area", *IEEE AP-S International Symposium and URSI Radio Science Meeting*; Baltimore, Maryland, vol1, pp. 1210-1213;1996.

[32] Y. Okumura et. al; “Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio services”; *Rev. Electr. Commun. Lab.*, vol 16, pp. 825-873;1968.

[33] M. Hata; “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services”; *IEEE Transactions on Vehicular Technology*; vol. VT-29, pp. 317-325; 1980.



JAVIER ALBERTO LUNA – SANTIAGO ANDRÉS AGREDO

[34] T. Rappaport; “Wireless Communications: Principles and Practice”; Prentice Hall; 2002.

[35] M. N. Namakforoosh; “Metodología de la Investigación”; Segunda Edición, Editorial Limusa S.A; México D.F. 2005

[36] L. Pedraza, C. Hernández; Proyecto de fin de carrera “Análisis Experimental para un modelo de Propagación de la telefonía Móvil de la Universidad Militar”; Universidad Militar Nueva Granada; Diciembre de 2009.

[37] O. Fernández; Tesis Doctoral; “Caracterización Experimental y Modelado de Canal MIMO para Aplicaciones WLAN y WMAN”; Universidad de Cantabria; Santander, España - mayo de 2007.