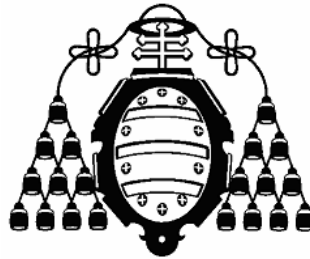


**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**Departamento de Informática**



**TESIS DOCTORAL**

**Modelo de cobertura en redes inalámbricas  
basado en radiosidad por refinamiento progresivo**

Presentada por

*Néstor García Fernández*

Para la obtención del Grado de Doctor por la Universidad de  
Oviedo

Dirigida por el

Profesor Doctor D. Juan Manuel Cueva Lovelle

*Oviedo, marzo de 2006*



---

## **Resumen**

---

En esta tesis se propone un nuevo modelo de predicción de cobertura en redes inalámbricas basado en la técnica de radiosidad, usada habitualmente para representación realista de imágenes, pero que nunca ha sido usada para modelar la propagación de radiofrecuencia en redes inalámbricas. Este modelo de propagación permite predecir mejor el comportamiento físico de la propagación, manteniendo el coste computacional dentro de unos límites aceptables.

Este nuevo modelo considera que los objetos que interceptan las señales de radiofrecuencia se comportan como nuevas fuentes de la señal reflejada. Se usa la técnica de Radiosidad por Refinamiento Progresivo para simular los múltiples trayectos generados por reflexiones de la señal que desde el emisor hasta el receptor, colisiona con obstáculos (muros, muebles, etc.).

El proceso de simulación se detiene cuando la señal propagada mediante reflexiones, llega a un nivel que es considerado insignificante. Se utiliza la variante de Radiosidad denominada Radiosidad por Refinamiento Progresivo para reducir el coste computacional de los cálculos.

La principal aplicación de este modelo es la predicción de cobertura en redes inalámbricas, permitiendo el diseño de redes inalámbricas partiendo del modelo físico del entorno en donde se pretende implantar, sin necesidad incluso de que haya sido construido dicho entorno.

### **Palabras clave**

Radiosidad, radiosidad por refinamiento progresivo, modelo de propagación, atenuación, reflexión, multitrayecto, WLAN, IEEE 802.11 (WiFi).

---

## **Abstract**

---

A new coverage prediction model in wireless networks is proposed in this thesis based on the radiosity technique, frequently used for realistic image synthesis, but never used for modelling wireless RF propagation. This propagation model allows us to better predict the physical behaviour of propagation, maintaining, at the same time, processing cost within acceptable limits.

This new model considers the objects which intercept the propagated signal as new signal sources of the reflected signal. The Radiosity by Progressive Refinement technique has been used to simulate the multipath propagation produced by reflections of the emitted signal, in the path towards a receiver, and collision with obstacles (walls, furniture, etc.).

The simulation process ends when the intensity of the propagated signal reaches some limits that are considered insignificant. For lower computation cost, the propagation model use a variant of radiosity, called Radiosity by Progressive Refinement.

The main application of the model is coverage prediction in wireless networks, supporting the design of wireless networks, starting from a physical model of the environment where the implementation is intended, perhaps yet inexistent.

### **Keywords**

Radiosity, Radiosity by Progressive Refinement, propagation model, attenuation, reflection, multipath, WLAN, IEEE 802.11 (WiFi)

---

## Agradecimientos

---

Este trabajo no habría sido posible sin la contribución de muchas personas que de forma directa e indirecta ofrecieron su apoyo.

De forma especial, agradezco el apoyo, los consejos y las constantes dosis de ánimo recibidas a lo largo de estos “largos” años, de mi director de tesis Juan Manuel Cueva Lovelle.

Gracias a Juan Ramón García Vigo y a David Ferrero Álvarez por el buen trabajo realizado en la implementación de los prototipos.

También a los compañeros del grupo de investigación y del departamento que en todo momento mostraron su solidaridad y su ánimo. Y a los otros también...

Por último, pero lo más importante, gracias a mi familia por apoyarme y mostrar su confianza en los momentos difíciles, o por hacerme olvidarlos.

Y gracias a Dios...



# Tabla de Contenidos

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.2 FASES DE DESARROLLO.....	2
1.3 ORGANIZACIÓN DE LOS CONTENIDOS.....	3
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>5</b>
<b>REDES INALÁMBRICAS.....</b>	<b>5</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	5
2.1.1 Evolución histórica de las WLAN.....	8
2.1.2 Redes Locales Inalámbricas (WLAN).....	13
2.1.3 Ámbito de aplicación.....	14
2.1.4 Ventajas sobre las LAN cableadas.....	14
2.1.5 Inconvenientes.....	16
2.1.6 Topología y configuraciones.....	18
2.1.6.1 Configuración Peer-to-Peer (Ad-Hoc).....	18
2.1.6.2 Configuración en modo Punto de Acceso.....	19
2.1.6.3 Otras configuraciones: Interconexión de redes.....	20
2.2 IEEE 802.11 Y SUS VARIANTES.....	20
2.2.1 Introducción.....	20
2.2.2 Arquitectura.....	24
2.2.3 Capas del IEEE 802.11.....	24
2.2.3.1 IEEE 802.11: Capa Física.....	25
2.2.3.2 IEEE 802.11: Capa de Enlace (MAC).....	35
2.2.4 Operativa básica en una WLAN.....	39
2.2.5 Asignación del espectro Radioeléctrico.....	41
2.3 FACTORES EN LA PROPAGACIÓN INALÁMBRICA.....	43
2.3.1 Antenas.....	43
2.3.1.1 Características de las antenas.....	44
2.3.1.2 Tipos de Antenas.....	47
2.3.2 Interferencias y ruido.....	48
2.4 COBERTURA WLAN INDOOR.....	50
2.4.1 Límites de Emisión en WLAN.....	50
2.4.2 Umbral mínimo de recepción.....	51
2.4.3 Propagación de ondas radioeléctricas indoor.....	51
2.4.3.1 Propagación en espacio libre (LOS).....	52
2.4.3.2 Propagación en Línea con Obstáculos (NLOS).....	52
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>61</b>
<b>TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN DE MODELOS.....</b>	<b>61</b>
3.1 TIPOS DE MODELOS.....	61
3.1.1 Modelos matemáticos.....	61
3.1.2 Modelos Empíricos o estadísticos.....	61
3.1.3 Modelos Teóricos.....	62
3.1.4 Modelos deterministas.....	62
3.1.5 Modelos estocásticos.....	62
3.1.6 Modelos de caja negra.....	62
3.2 VALIDEZ DE UN MODELO.....	62
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>65</b>
<b>MODELOS DE PROPAGACIÓN EN REDES INALÁMBRICAS.....</b>	<b>65</b>
4.1 MODELOS OUTDOOR.....	66
4.2 ALGUNOS MODELOS DE PROPAGACIÓN INDOOR.....	66
4.2.1 Modelos Empíricos de propagación de ondas electromagnéticas.....	67
4.2.1.1 Modelo de Propagación en el Espacio Libre.....	67
4.2.1.2 Log-Normal Shadowing Path Loss Model.....	69
4.2.1.3 Modelo de Pérdida de Trayecto basado en COST 231.....	70
4.2.1.4 Modelo basado en el número de muros y suelos (simplificado).....	71

4.2.1.5 Modelo ITU-R .....	72
4.2.1.6 Linear Path Attenuation Model.....	72
4.2.1.7 Dual Slope-Model.....	72
4.2.1.8 Keenan-Motley Model.....	73
4.2.1.9 Multi-Wall Model.....	73
4.2.2 Modelos Teóricos de propagación de ondas electromagnéticas.....	75
4.2.2.1 Modelos basados en Ray-Tracing.....	75
4.2.2.2 Modelos FDTD.....	75
4.2.3 Otros modelos de propagación de ondas electromagnéticas.....	76
4.2.3.1 Modelo ETF-ANN.....	76
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>77</b>
<b>REQUISITOS DEL MODELO DE COBERTURA EN REDES</b>	
<b>INALÁMBRICAS .....</b>	<b>77</b>
5.1 OBJETIVOS DEL MODELO .....	77
5.2 TIPO DE MODELO .....	77
5.3 AJUSTADO A CASOS REALES .....	78
5.3.1 Capacidad de importar la geometría del recinto.....	78
5.3.2 Capacidad de importar las propiedades de los materiales del recinto .....	78
5.4 USO DE RADIOSIDAD .....	78
5.5 COSTE COMPUTACIONAL ACEPTABLE.....	79
5.6 REQUISITOS DEL PROTOTIPO.....	79
5.6.1 Interactivo .....	79
5.6.2 Interfaz gráfica .....	79
5.6.3 Exportación de datos.....	80
5.6.4 Usabilidad .....	80
5.6.5 Calibrado del modelo y comprobación de resultados.....	80
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>81</b>
<b>DISEÑO DEL MODELO.....</b>	<b>81</b>
6.1 MODELO DE SIMULACIÓN WI-FI .....	81
6.2 OBTENCIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO TRIDIMENSIONAL .....	81
6.3 PROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE (LOS).....	82
6.3.1 Ajuste del Modelo de Cobertura basado en mediciones .....	82
6.3.1.1 Distancia de medida.....	82
6.3.1.2 Medidas de corta distancia con LOS.....	83
6.3.1.3 Medidas de larga distancia con LOS.....	83
6.3.1.4 Medidas de corta distancia con NLOS.....	83
6.3.1.5 Procesado de datos.....	83
6.4 PROPAGACIÓN EN LÍNEA CON OBSTÁCULOS: PENETRACIÓN.....	85
6.4.1 Colisiones.....	86
6.4.1.1 Colisión con un plano .....	87
6.4.1.2 Colisión con un triángulo.....	89
6.4.2 Tratamiento de Colisiones.....	90
6.5 SIMULACIÓN DE MULTITRAYECTO: RADIOSIDAD.....	90
6.5.1 Energía reflejada inicial .....	90
6.5.2 Descripción de Reflexiones Difusas y Ecuación de Radiosidad.....	94
6.6 RESUMEN DEL DISEÑO.....	101
<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>103</b>
<b>DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA EL MODELO.....</b>	<b>103</b>
7.1 INTRODUCCIÓN.....	103
7.2 ANÁLISIS: MODELO DE REQUISITOS .....	107
7.2.1 Especificación textual .....	107
7.2.2 Especificación de requisitos.....	107
7.2.3 Casos de Uso y Escenarios.....	110
7.2.3.1 Actores.....	110
7.2.4 Modelo de Casos de Uso.....	111
7.2.4.1 Caso de Uso 1: Cargar modelo .....	112
7.2.4.2 Caso de Uso 2: Guardar modelo .....	113
7.2.4.3 Caso de Uso 3: Cerrar .....	114
7.2.4.4 Caso de Uso 4: Instalar AP.....	115



---

7.2.4.5 Caso de Uso 5: Trasladar AP .....	115
7.2.4.6 Caso de Uso 6: Configurar AP .....	116
7.2.4.7 Caso de Uso 7: Desmontar AP .....	117
7.2.4.8 Caso de Uso 8: Configurar modelo .....	118
7.2.4.9 Caso de Uso 9: Simular modelo .....	120
7.2.4.10 Caso de Uso 10: Comparar resultados .....	123
7.3 DISEÑO PRELIMINAR .....	124
7.3.1 Memoria del Diseño Preliminar .....	124
7.3.2 Diagrama de Clases .....	125
7.3.3 Diagramas de Secuencia .....	126
7.3.3.1 Escenario 1.1: Cargar Modelo .....	126
7.3.3.2 Escenario 1.2: Cargar Simulación .....	127
7.3.3.3 Escenario 2.1: Guardar Simulación .....	128
7.3.3.4 Escenario 3.1: Cerrar Escena .....	128
7.3.3.5 Escenario 3.2: Cerrar Modelo .....	129
7.3.3.6 Escenario 4.1: Instalar Punto de Acceso .....	129
7.3.3.7 Escenario 5.1: Trasladar Punto de Acceso .....	130
7.3.3.8 Escenario 6.1 Configurar Punto de Acceso .....	130
7.3.3.9 Escenario 7.1: Desmontar Punto de Acceso .....	131
7.3.3.10 Escenario 8.1: Modificación de preferencias de materiales .....	131
7.3.3.11 Escenario 8.2: Modificación de preferencias de propagación .....	132
7.3.3.12 Escenario 8.3: Modificación de preferencias algoritmo de radiosidad .....	132
7.3.3.13 Escenario 8.4: Modificación de preferencias sobre los sensores .....	133
7.3.3.14 Escenario 9.1: Predicción de propagación directa .....	133
7.3.3.15 Escenario 9.2: Predicción de propagación multitrayecto .....	134
7.3.3.16 Escenario 9.3: Predicción de propagación conjunta .....	135
7.3.3.17 Escenario 9.4: Predicción de propagación multi-wall .....	135
7.3.3.18 Escenario 9.5: Predicción de propagación linear path .....	136
7.3.3.19 Escenario 9.6: Predicción de propagación dual slope .....	136
7.3.3.20 Escenario 9.7: Predicción de propagación Keenan-Motley .....	137
7.3.3.21 Escenario 10.1: Comparación de resultados .....	137
7.3.4 Diagramas de Colaboración .....	138
7.3.5 Descripción de Clases .....	139
7.3.5.1 Cmodelo .....	139
7.3.5.2 Cemisor .....	141
7.3.5.3 CaccessPoint .....	141
7.3.5.4 Cescena .....	142
7.3.5.5 CredSensorial .....	144
7.3.5.6 Csensor .....	145
7.3.5.7 Cobj3D .....	146
7.3.5.8 Cvertice .....	147
7.3.5.9 Cpolígono .....	147
7.3.5.10 Cmaterial .....	148
7.3.5.11 CLoadASE .....	149
7.3.5.12 Cview .....	149
7.4 DISEÑO DETALLADO .....	150
7.4.1 Memoria del Diseño Detallado .....	150
7.4.2 Diagramas de Clases .....	151
7.4.3 Diagramas de Secuencia .....	151
7.4.4 Descripción Detallada de Clases — Diccionario de Datos .....	152
7.4.4.1 Cmodelo .....	152
7.4.4.2 Cemisor .....	153
7.4.4.3 CaccessPoint .....	154
7.4.4.4 Cescena .....	155
7.4.4.5 CredSensorial .....	156
7.4.4.6 Sensor .....	157
7.4.4.7 Cobj3D .....	158
7.4.4.8 Cvertice .....	159
7.4.4.9 Cpolígono .....	160

---

7.4.4.10 Cmaterial.....	161
7.4.4.11 Cview.....	162
7.4.4.12 CLoadASE.....	163
<b>CAPÍTULO 8.....</b>	<b>165</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO: ZONAWIFI .....</b>	<b>165</b>
8.1 HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA IMPLEMENTACIÓN .....	166
8.2 UTILIZACIÓN DEL PROTOTIPO.....	166
8.2.1 Configuración de los parámetros de los modelos de propagación .....	167
8.2.2 Configuración de la red sensorial.....	169
8.2.3 Configuración de las propiedades de los materiales .....	170
8.2.4 Instalación de puntos de acceso .....	171
8.2.5 Realización de simulaciones .....	174
8.2.6 Visualización de resultados.....	177
8.2.7 Análisis de resultados.....	178
<b>CAPÍTULO 9.....</b>	<b>179</b>
<b>PRUEBAS TEÓRICAS.....</b>	<b>179</b>
9.1 MEMORIA DE LAS PRUEBAS TEÓRICAS.....	179
9.2 CASOS DE PRUEBA TEÓRICOS.....	179
9.2.1 Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos.....	179
9.2.1.1 Propagación Directa.....	180
9.2.1.2 Propagación Multi-Wall .....	182
9.2.1.3 Propagación Linear-Path.....	184
9.2.1.4 Propagación Dual-Slope .....	186
9.2.1.5 Propagación Keenan-Motley .....	188
9.2.1.6 Propagación Multitrayecto.....	190
9.2.1.7 Propagación Conjunta.....	191
9.2.1.8 Comparativas conjuntas Resultados Teóricos (Caso 1) .....	192
9.2.1.9 Comparativas conjuntas Prototipo ZonaWiFi (Caso 1) .....	192
9.2.2 Caso 2: Prueba de Propagación (claustro).....	193
9.2.2.1 Propagación Directa.....	193
9.2.2.2 Propagación Multi-Wall .....	195
9.2.2.3 Propagación Linear-Path.....	197
9.2.2.4 Propagación Dual-Slope .....	199
9.2.2.5 Propagación Keenan-Motley .....	201
9.2.2.6 Propagación Multitrayecto.....	203
9.2.2.7 Propagación Conjunta.....	203
9.2.2.8 Comparativas conjuntas Resultados Teóricos (Caso 2) .....	204
9.2.2.9 Comparativas conjuntas Prototipo ZonaWiFi (Caso 2) .....	205
9.2.3 Caso 3: Pruebas del Modelo de Propagación Directa .....	206
9.2.3.1 Caso 3.1: Prueba de Propagación Directa sin Obstáculos: Influencia de n y Xsigma .....	206
9.2.3.2 Caso 3.2: Prueba de Propagación Directa con Obstáculos: Doble Pasillo .....	206
9.2.4 Caso 4: Pruebas de Propagación Multiwall.....	210
9.2.5 Caso 5: Pruebas de Propagación Linear Path.....	211
9.2.5.1 Prueba con distintos coeficientes de atenuación lineal .....	211
9.2.5.2 Prueba de modificaciones en la potencia de emisión del punto de acceso.....	211
9.2.5.3 Prueba de modificaciones en el valor de PL(d <sub>0</sub> ) .....	211
9.2.6 Caso 6: Pruebas de Propagación Dual Slope.....	212
9.2.6.1 Prueba de modificación de punto de ruptura.....	212
9.2.6.2 Prueba de modificación de exponentes n <sub>1</sub> y n <sub>2</sub> .....	212
9.2.7 Caso 7: Pruebas de Propagación Keenan-Motley .....	213
9.2.7.1 Prueba de variaciones en la atenuación de suelos.....	213
9.2.7.2 Prueba de variaciones en el PL(d <sub>0</sub> ).....	214
9.2.7.3 Prueba de variaciones en la potencia de emisión .....	214
9.2.7.4 Prueba de variaciones en el coeficiente de atenuación .....	215
<b>CAPÍTULO 10.....</b>	<b>217</b>
<b>CALIBRACIÓN Y PRUEBAS REALES .....</b>	<b>217</b>
10.1 CALIBRACIÓN .....	217
10.1.1 Ajuste del Modelo de Cobertura basado en mediciones.....	217

10.2 CASOS DE PRUEBA REALES .....	220
10.2.1 Caso 8: Prueba de Modelo Real (Edificio de Ciencias – Planta Baja — Punto de acceso central) .....	220
10.2.2 Caso 9: Prueba de Modelo Real (Edificio de Ciencias – Planta Baja – Punto de acceso lateral) .....	222
10.2.2.1 Propagación Directa vs Medidas Reales .....	224
10.2.2.2 Propagación Multitrayecto vs Medidas Reales .....	225
10.2.2.3 Propagación Conjunta (tesis) vs Medidas Reales .....	226
10.2.2.4 Propagación Multi-Wall vs Medidas Reales .....	227
10.2.2.5 Propagación Linear-Path vs Medidas Reales .....	228
10.2.2.6 Propagación Dual-Slope vs Medidas Reales .....	229
10.2.2.7 Propagación Keenan-Motley vs Medidas Reales .....	230
10.2.3 Caso 10: Prueba de Modelo Real (Edificio de Ciencias – Planta Bajocubierta) .....	231
10.2.3.1 Bajocubierta: Línea A .....	233
10.2.3.2 Bajocubierta: Línea B .....	234
10.2.3.3 Bajocubierta: Línea C .....	236
10.2.3.4 Bajocubierta: Línea D .....	237
10.2.3.5 Bajocubierta: Línea E .....	238
10.2.3.6 Bajocubierta: Línea F .....	239
10.2.3.7 Bajocubierta: Línea G .....	240
10.2.3.8 Bajocubierta: Línea H .....	241
10.2.3.9 Bajocubierta: Línea J .....	242
10.2.3.10 Resultados comparados .....	243
<b>CAPÍTULO 11.....</b>	<b>257</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>257</b>
11.1 DISCUSIÓN GENERAL .....	257
11.2 ALGUNOS RESULTADOS DESTACABLES .....	258
11.3 CONCLUSIONES GENERALES .....	259
11.4 CONCLUSIONES PARTICULARES .....	259
11.4.1 Pruebas teóricas .....	259
11.4.2 Pruebas reales .....	263
11.4.3 Comparación con otros modelos .....	264
<b>CAPÍTULO 12.....</b>	<b>265</b>
<b>NUEVAS PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>265</b>
12.1 TRABAJO Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS .....	265
12.1.1 Modelado de otros fenómenos de propagación, y de otros tipos de obstáculos .....	265
12.1.2 Combinación de modelos de propagación .....	266
12.1.3 Ubicación automática de los sitios óptimos para puntos de acceso .....	266
12.1.4 Adaptación del modelo a espacios abiertos. Uso de WiMax .....	267
<b>CAPÍTULO 13.....</b>	<b>269</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>269</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>273</b>
<b>ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....</b>	<b>273</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>275</b>
<b>COMPARATIVA DE DATOS DE SEÑAL .....</b>	<b>275</b>
B.1 PRUEBA DE PROPAGACIÓN SIN OBSTÁCULOS .....	275
B.2 PRUEBA DE PROPAGACIÓN (CLAUSTRO).....	278
B.3 PRUEBA DE PROPAGACIÓN (PLANTA BAJA, PUNTO ACCESO LATERAL) .....	281
B.4 PRUEBA DE PROPAGACIÓN (BAJOCUBIERTA) .....	283



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es la descripción de un sistema de modelado de cobertura en redes inalámbricas.

Un modelo es una representación aproximada de la realidad. Una conceptualización de un evento, un proyecto, una hipótesis, el estado de una cuestión, que se representa como un esquema con símbolos descriptivos de las características y relaciones más importantes.

La tecnología inalámbrica, cada vez está siendo más utilizada en las redes de ordenadores debido a que permiten una amplia libertad de movimientos, rapidez en la instalación y facilidad en la reubicación de las estaciones de trabajo evitando la necesidad de establecer cableado.

Los sistemas existentes en estos momentos permiten predecir los niveles de cobertura basándose en diversos modelos, que se pretenden comparar con el modelo diseñado.

En esta tesis se realiza un estudio comparativo de los principales modelos utilizados para el cálculo de cobertura en redes inalámbricas; en particular referidas a redes dentro de edificios (INDOOR). El sistema propuesto se basa en la utilización de radiosidad, una técnica que se aplica en Informática Gráfica, para la representación realista de imágenes. La variante de radiosidad por refinamiento progresivo se utiliza para hacer el modelo computacionalmente más eficiente.

Se consideran objetivos fundamentales: obtener un modelo de predicción de cobertura en redes inalámbricas, diseñar un prototipo que implemente el modelo, y que permita realizar comparativas entre modelos y datos reales. Como objetivo final, se busca la valoración cualitativa del modelo diseñado, comparándolo con casos reales y con otros modelos de propagación.

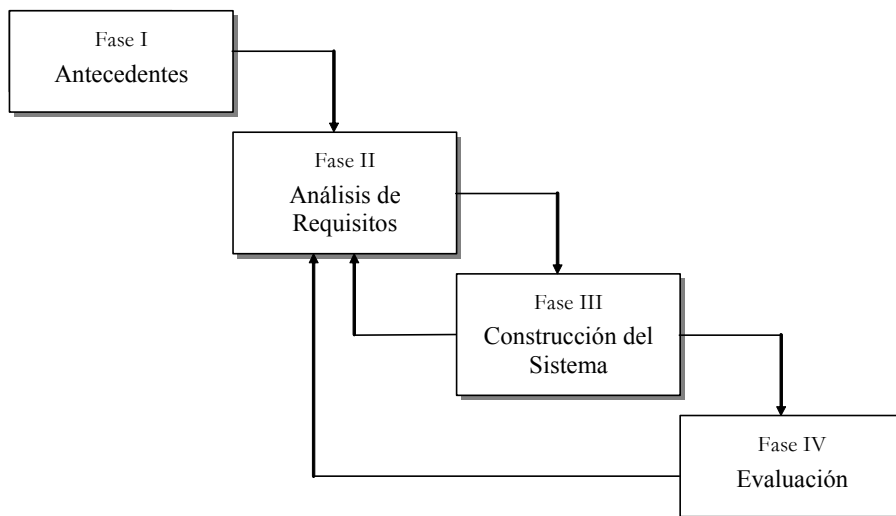
En este documento se realiza un estudio de diferentes modelos de propagación, y se propone el nuevo modelo que es comparado con los siguientes: MultiWall Model, Linear Path Attenuation Model, Dual Slope Model y Keenan-Motley Model.

Para comprobar la adecuación del nuevo modelo, se diseña e implementa un prototipo en el que se pueden comprobar las predicciones realizadas con los modelos estudiados, con el nuevo modelo, y con datos de cobertura reales introducidos como medidas de campo.

El prototipo permite visualizar los niveles de cobertura de red inalámbrica en un edificio, cuyo modelado geométrico tridimensional se ha realizado utilizando herramientas clásicas de modelado. Como demostración práctica, se prueba el modelo sobre el Edificio de Ciencias de la Universidad de Oviedo, y su red inalámbrica.

## 1.2 Fases de desarrollo

En este apartado se describen las fases de trabajo en las que se divide el desarrollo de la tesis. En él no se hace mención al contenido desarrollado en cada fase, sino a los aspectos funcionales de cada una.



**Figura 1.1:** Fases de desarrollo

1. En la primera fase, se trata de analizar qué ofrecen los sistemas actuales de modelado de cobertura en redes inalámbricas. En este estudio se conseguirá un conocimiento profundo de la forma de operar y las características que ofrecen. Asimismo, una visión conjunta permitirá realizar comparativas que lleven a la obtención explícita de críticas de los sistemas revisados y de los fallos existentes, se podrán extraer conclusiones que resulten de utilidad para los nuevos planteamientos.
2. En la segunda fase, se realiza un análisis de los requisitos deseables para el diseño del nuevo sistema. Los aspectos generales del sistema y los aspectos

relacionados con la arquitectura del sistema servirán de base para la elección de los requisitos de partida.

3. Como consecuencia de los requisitos impuestos y los conocimientos adquiridos en la primera fase, se realiza el diseño del sistema, y se construye el prototipo. Esta fase se concibe como resultado del proceso de crítica, reflexión y selección de posibilidades iniciado después del desarrollo de la primera fase. A ello hay que añadir un proceso de síntesis y consecución de un nuevo sistema que se ajusta mejor a los requisitos de partida y que tiene ventajas sobre los existentes. Finalmente, dentro de esta fase, se formalizará este sistema, analizando sistemáticamente todos los aspectos que intervienen en él.
4. Una vez formalizado el sistema, se procede a la descripción de las características que corroboran la bondad de éste, y su mayor adecuación respecto a otros ya existentes. La implementación de un prototipo es fundamental y sirve para apoyar esta demostración.

### 1.3 Organización de los contenidos

La estructura de esta tesis está organizada según las fases de desarrollo descritas anteriormente. Se realiza un estudio del estado del arte referido a redes inalámbricas y modelos de propagación en redes inalámbricas, posteriormente se establecen los requisitos del modelo, y se diseña el nuevo modelo. Para comprobar el nuevo modelo, se diseña e implementa un prototipo, y se comprueba su adecuación.

El capítulo 2, *Redes inalámbricas*, está dedicado a ofrecer una introducción de los conceptos básicos de las redes inalámbricas. En él se definen los fundamentos teóricos que influyen en la propagación de señales de radiofrecuencia.

El capítulo 3, *Técnicas de Construcción de Modelos*, se dedica a analizar los tipos de modelos: estructura, clasificación, etc.

El capítulo 4, *Modelos de propagación en redes Inalámbricas*, realiza una visión general del estado del arte de los sistemas utilizados. Para ello, se han seleccionado un conjunto de modelos que son representativos de las diferentes técnicas de construcción de modelos de propagación. De cada uno de estos sistemas, se lleva a cabo una pequeña descripción de sus características.

El capítulo 5, *Requisitos del Modelo de cobertura en redes inalámbricas*, realiza una descripción de aquellos requisitos que se consideran importantes para la consecución del sistema propuesto. Los requisitos planteados en este capítulo afectan principalmente al diseño y a la construcción de dicho sistema.

El capítulo 6, *Diseño del Modelo*, se desarrolla el modelo de cobertura.

El capítulo 7, *Diseño de un Prototipo para el Modelo*, describe el diseño de un prototipo para el sistema atendiendo a las características especificadas en los dos capítulos anteriores.

El capítulo 8, *Implementación del Prototipo: ZonaWiFi*, describe los pasos seguidos para la obtención de una versión inicial del prototipo; y posteriormente la implementación de una herramienta de simulaciones que utilizando diversos modelos de propagación (ampliación del prototipo), y datos de campo reales tomados sobre el entorno modelado, permite realizar comparativas.

En el capítulo 9, *Pruebas Teóricas*, se muestran las pruebas realizadas en diferentes entornos no reales, pero que contienen elementos y obstáculos que permiten comprobar que los resultados obtenidos son los esperados.

En el capítulo 10, *Calibración y Pruebas Reales*, se realizan pruebas en modelos geométricos de entornos reales. Para ajustar los modelos a las condiciones del entorno, se hacen una serie de mediciones, de las que se van a obtener los parámetros de los modelos de propagación, lo que constituye la calibración del modelo. En el último apartado del capítulo, se muestran los resultados comparados entre los diferentes modelos implementados en el prototipo, y los datos reales de medición tomados en el entorno.

En el capítulo 11, *Conclusiones*, se valoran los modelos de propagación propuestos en esta tesis, comparándolos con los resultados de otros modelos de cobertura en redes inalámbricas. También se resumen las principales conclusiones obtenidas como consecuencia de la elaboración de este trabajo.

En el Capítulo 12, *Nuevas propuestas de investigación*, se muestran las líneas de investigación futuras que se desarrollarán desde el punto de partida de esta tesis.

Finalmente en el Capítulo 13 aparece la bibliografía utilizada en este trabajo.

En el Anexo A se presenta una sección de abreviaturas y acrónimos, muy útil, dado el gran número de términos de este tipo que se utilizan en los temas tratados.

En el Anexo B, se recogen los datos de cobertura en los sensores para los diferentes casos de pruebas teóricas y reales.



# CAPÍTULO 2

## REDES INALÁMBRICAS

---

### 2.1 Introducción

En los últimos años las redes de área local inalámbricas (WLAN, Wireless Local Area Network) están ganando mucha popularidad, que se ve acrecentada conforme sus prestaciones aumentan y se descubren nuevas aplicaciones para ellas. Las WLAN permiten a sus usuarios acceder a información y recursos en tiempo real sin necesidad de estar físicamente conectados a un determinado lugar.

Con las WLANs, la red por sí misma es móvil, elimina la necesidad de usar cables y establece nuevas aplicaciones añadiendo flexibilidad a la red; y lo más importante, incrementa la productividad y eficiencia en las empresas donde está instalada. Un usuario dentro de una red WLAN puede transmitir y recibir voz, datos y vídeo dentro de edificios, entre edificios o campus universitarios e incluso sobre áreas metropolitanas a velocidades de 11 Mbit/s o superiores.

Pero no solamente encuentran aplicación en las empresas, si no que su extensión a ambientes públicos, en áreas metropolitanas como medio de acceso a Internet o para cubrir zonas de alta densidad de usuarios (hot spots) en las próximas redes de tercera generación (3G), se ven como las aplicaciones de más interés.

Muchos de los fabricantes de ordenadores y equipos de comunicaciones como los PDAs (Personal Digital Assistants), módems, terminales de punto de venta y otros dispositivos están introduciendo aplicaciones soportadas en las comunicaciones inalámbricas.

Las nuevas posibilidades que ofrecen las WLANs son: permitir una fácil incorporación de nuevos usuarios a la red, ofrecer una alternativa de bajo costo a los sistemas cableados, además de la posibilidad para acceder a cualquier base de datos o cualquier aplicación localizada dentro de la red.

Al igual que las redes tradicionales cableadas vamos a clasificar a las redes inalámbricas en tres categorías:

- WAN/MAN (Wide Area Network/Metropolitan Area Network)
- LAN (Local Area Network)
- PAN (Personal Area Network)

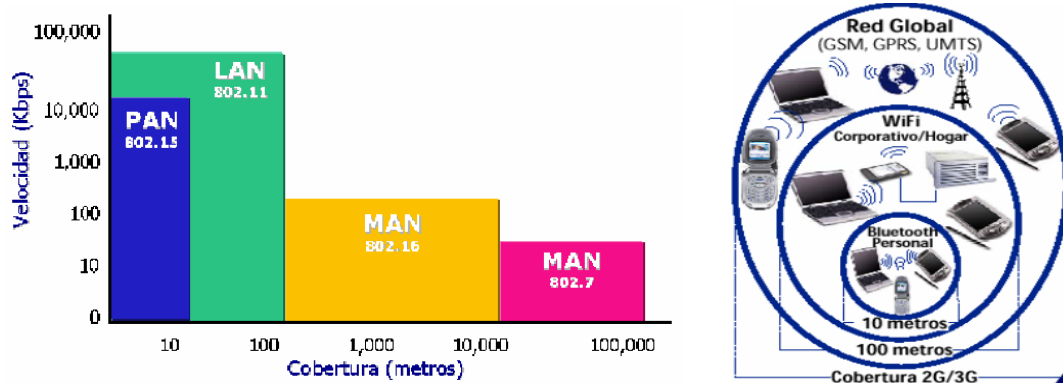


Figura 1 Clasificación de redes inalámbricas

En la primera categoría WAN/MAN, pondremos a las redes que cubren desde decenas hasta miles de kilómetros, cuya finalidad es la constitución de redes globales de comunicación móvil. Como ejemplo de estas redes se encuentran los siguientes sistemas:

- GSM (*Global System for Mobile Communications*): Sistema global de comunicaciones móviles de 2ª generación (2G) que permite comunicaciones de hasta 9,6 Kbps.
- GPRS (*General Packet Radio Service*): Estándar de comunicaciones móviles que permite velocidades de hasta 115 Kbps.
- UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*): Tecnología de comunicaciones móviles de 3º generación (3G) que ofrece velocidades desde 144 Kbps hasta 2 Mbps.

En la segunda categoría LAN, pondremos las redes que comprenden de varios metros hasta decenas de metros. Permiten la creación de redes locales sin cables, realizando la comunicación por ondas de radio. La tecnología más conocida es el estándar 802.11 (o WiFi) que opera dentro de los 2.4 GHz (5 GHz 802.11a) y provee un ancho de banda de hasta 54 Mbps.

La norma IEEE 802.11 estableció en junio de 1997 el estándar para redes inalámbricas, siendo su finalización definitiva para la introducción y desarrollo de los sistemas WLAN en el mercado. Una red de área local inalámbrica puede definirse como una red de alcance local que tiene como medio de transmisión el aire. El estándar 802.11 es muy similar al 802.3 (Ethernet) con la diferencia que tiene que adaptar todos sus métodos a un medio no guiado de transmisión. En este estándar se encuentran las especificaciones tanto físicas como a nivel de enlace MAC.

Por otro lado el foro global HiperLAN2 definió una especificación que opera en la banda de 5 GHz y que permite la transferencia de datos de hasta 54 Mbps que utiliza una técnica de modulación conocida como OFDM (Orthogonal Frequency Digital Multiplexing) para transmitir señales analógicas. OFDM es muy eficiente en ambientes dispersos en el tiempo, como oficinas, donde las señales de radio son reflejadas desde muchos puntos antes de que llegue al receptor. Debido a que HiperLAN es orientado a conexión posee características de Calidad de Servicio (QoS). El soporte de QoS en combinación con las altas velocidades de HiperLAN facilita la transmisión de diferentes tipos de ráfagas de datos como vídeo, voz y datos.

<b>Comparación entre las tecnologías WLANs</b>					
<b>Característica</b>	<b>802.11</b>	<b>802.11b</b>	<b>802.11a</b>	<b>802.11g</b>	<b>HiperLAN2</b>
Espectro	2.4 GHz	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	5 GHz
Máxima tasa de transmisión	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	54 Mbps	54 Mbps
Conexión	No-orientado a conexión	No-orientado a conexión	No-orientado a conexión	No-orientado a conexión	Orientado a conexión
Encriptación	RC4 de 40 bits	RC4 de 40 bits	RC4 de 40 bits		DES, 3DES
Multicast	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Soporte de redes fijas	Ethernet	Ethernet	Ethernet	Ethernet	Ethernet , IP, ATM, UMTS, FireWire , PPP
Selección de frecuencias	FHSS o DSSS	DSSS	OFDM portadora única	DSSS y OFDM	portadora única con selección dinámica de frecuencias

*FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum*  
*DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum*  
*ATM: Asynchronous Transfer Mode*  
*OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing*  
*IP: Internet Protocol*  
*DES: Data Encryption Standard*  
*UMTS: Universal Mobile Telephone Service*  
*PPP: Point - Point Protocol*

Por último, en la categoría PAN pondremos a las redes que comprenden desde muy poca distancia hasta 30 metros. Se trata de redes personales que tienen como principal fin eliminar los cables de comunicación con todos los dispositivos electrónicos (PC con periféricos o accesorios, teléfonos móviles, cámaras...). Su principal exponente es la tecnología Bluetooth, pero existen otras como 802.15 y HomeRF.

Bluetooth es una tecnología inalámbrica europea desarrollada por Ericsson que permite la inter-conectividad de dispositivos inalámbricos con otras redes e Internet. Bluetooth, al igual que 802.15 y HomeRF, trabajan en la banda de frecuencias de espectro extendido de 2.4 GHz. Bluetooth es capaz de transferir información entre un dispositivo a otro a velocidades de hasta 1 Mbps, permitiendo el intercambio de vídeo, voz y datos de manera inalámbrica.

El Estándar IEEE 802.15 se enfoca básicamente en el desarrollo de estándares para redes tipo PAN o redes inalámbricas de corta distancia. Al igual que Bluetooth, el 802.15 permite que dispositivos inalámbricos portátiles como PCs, PDAs y teléfonos, entre otros, puedan comunicarse e interoperar uno con el otro. Debido a que Bluetooth no puede coexistir con una red inalámbrica 802.11x, la IEEE definió este estándar para permitir la interoperabilidad de las redes inalámbricas LAN con las redes tipo PAN.

HomeRF también es una especificación que permite la interconexión de dispositivos inalámbricos en un área pequeña.

Con cualquiera de estas tres últimas tecnologías se podrá acceder a la red de casa u oficina desde un teléfono celular y se podrá controlar dispositivos o consultar a distancia los datos y acceder a Internet con sólo conectarse a la red.

### **2.1.1 Evolución histórica de las WLAN**

La tecnología de las redes inalámbricas no es precisamente nueva, ha sido utilizada tanto en la industria como en centros de investigación desde hace más de 15 años. El origen de las LAN inalámbricas se remonta a la publicación en 1979 de los resultados de un experimento realizado por ingenieros de IBM en Suiza, consistente en utilizar enlaces infrarrojos para crear una red local en una fábrica. Estos resultados, publicados en el volumen 67 de los Proceedings del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), puede considerarse como el punto de partida en la línea evolutiva de esta tecnología. Las investigaciones siguieron adelante tanto con infrarrojos como con microondas, tecnología que actualmente se está empleando, donde se utilizaba el esquema del spread spectrum (espectro extendido), siempre en el ámbito de laboratorio.

En mayo de 1985, y tras cuatro años de estudios, el FCC (Federal Communications Commission), la Agencia Federal del Gobierno de Estados Unidos encargada de regular y administrar en materia de telecomunicaciones, asignó las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) 902-928 MHz, 2,400-2,4835 GHz, 5,725-5,850 GHz a las redes inalámbricas basadas en spread spectrum. ISM es una banda para uso comercial sin licencia.

#### **1.997- Aparece 802.11, primer estándar mundial de redes inalámbricas**

Refiriéndonos al pasado más reciente, es concretamente en Junio de 1.997 cuando el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ratifica el estándar 802.11 como el primer estándar mundial WLAN (redes locales inalámbricas). Esa primera versión proporcionaba velocidades de 1 y 2 Mbps. en las frecuencias de 2,4 GHz., así como un conjunto de métodos de señalización y otros servicios de red.

En estos primeros momentos y tras el desarrollo del primer estándar, la demanda seguía en niveles muy bajos. La limitada capacidad de estas primeras WLAN estandarizadas era muy baja y no podía satisfacer las necesidades de la mayoría de las empresas.

### **1999. Aparece 802.11b - Wi-Fi se adopta como sello distintivo**

Consciente de la necesidad de conseguir mayores velocidades de transmisión de datos, IEEE ratificó en 1.999 el estándar 802.11b, también conocido como 802.11 High Rate, que opera a velocidades de hasta 11 Mbps. Este estándar dispone de un nuevo método de selección de frecuencias por secuencia directa (DS).

En Agosto de 1.999 los principales promotores de la tecnología DS formaron WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), encargada de certificar la interoperatividad de productos IEEE 802.11b. Al mes siguiente la WECA adopta Wi-Fi (Wireless Fidelity) como sello distintivo. Wi-Fi es el certificado de interoperatividad que aparece como logotipo (*Figura 2*) en los productos comprobados. Posteriormente se agregaron las letras a, b, g para especificar cuál de los estándares se cumple.



Figura 2 Logotipo de certificación WiFi

### **1999. Tras 802.11b, aparece 802.11a**

Además del estándar 802.11b, en 1.999 se aprueba el 802.11a. Este estándar opera en la frecuencia de 5 Ghz. y alcanza una velocidad máxima de 54 Mbps. La técnica de modulación de radio que utiliza 802.11a es la clave de sus mayores velocidades y eficiencia en la prestación. Sin embargo, la frecuencia de 5 Ghz. tan sólo alcanza una distancia de 30 metros, frente a los 100 metros de la frecuencia de 2.4 Ghz. Además presenta claros problemas de interferencias, sobre todo en EE.UU., ya que los sistemas militares de defensa ocupan esta misma frecuencia y saturan el espectro.

A pesar de estos problemas, el llamado Wi-Fi5 (802.11a) se impuso en su día al 802.11b en EE.UU.

### **Año 2002. 802.11 g**

Con la aprobación de la nueva versión 802.11g se ha conseguido que el actual índice de transmisión de datos de 11 Mbps empleado por la versión *b*, pase a ser de 54 Mbps, lo que permitirá dar servicio a 4 ó 5 veces más de usuarios, y extender el uso de las redes 802.11 a servicios bastante demandados como la transmisión inalámbrica de vídeo-multimedia y la difusión de MPEG.

Las unidades 802.11g podrán trabajar también a velocidades de 11 Mbps, de modo que los dispositivos 802.11b y 802.11g puedan coexistir bajo la misma red. Los dos estándares aplicarán la banda de frecuencia de 2.4 GHz.

### **802.11n a partir de 2005**

Actualmente el estándar final está fechado para el 2006/2007, aunque los productos compatibles podrían aparecer ya a finales del 2005. 802.11n proporcionará velocidades de al menos 100Mbps con un máximo teórico de 500Mbps.

802.11n necesita ser capaz de usar el canal con 20Mhz de ancho, el mismo que 802.11b y 802.11g, a fin de que no siga los pasos del 802.11a, que se despoja de compatibilidad con estándares anteriores a cambio de velocidades mayores, pero la compatibilidad con 802.11b de 802.11g le dio el triunfo frente a 802.11a.

Estas altas velocidades serían alcanzadas utilizando una serie de antenas 4x4 y un canal de 40Mhz de ancho, pero gracias a la compatibilidad con anchos de canal de 20Mhz, la tecnología sería capaz de retroceder a una tecnología más lenta cuando sea usado en países que prohíban el uso de los 40Mhz del canal.

### **El futuro de wireless: WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)**

Desde que entramos en el nuevo milenio, las redes inalámbricas no han hecho más que proliferar. WiFi, el estándar creado por el IEEE, ha permitido a los usuarios moverse alrededor de muchos sitios sin necesidad de que los dispositivos portátiles o PDA tengan cables. Ahora es el turno de WiMAX, que promete ampliar la banda ancha inalámbrica reduciendo costos.

Contrariamente al acceso inalámbrico Wi-Fi, que sólo permite la conexión con la Web dentro de zonas muy restringidas, las estaciones base de Wi-MAX podrían extender el espectro de conectividad a 50 kilómetros, lo que supone un gran avance en comparación con los 91 metros de Wi-Fi, y ni qué decir sobre los 9 metros de Bluetooth.

La mayor distancia de cobertura es clave para permitir que los proveedores de servicios sean capaces de ofrecer acceso a Internet de banda ancha directamente a los hogares, sin tener que tender un cable físico hasta el final; lo que se conoce como la "última milla", que conecta a cada uno de los hogares con la red principal de cada proveedor. En un escenario típicamente casero, el receptor Wi-MAX que provee acceso a Internet podría estar conectado al router Wi-Fi que enlaza todos los dispositivos que utilizan la red en la casa.

Por este motivo, Wi-MAX está considerada como una alternativa más barata a las líneas de suscripción digital y a los accesos de cable de banda ancha, ya que los costos de instalación de una infraestructura inalámbrica son mínimos si se comparan con las versiones cableadas.

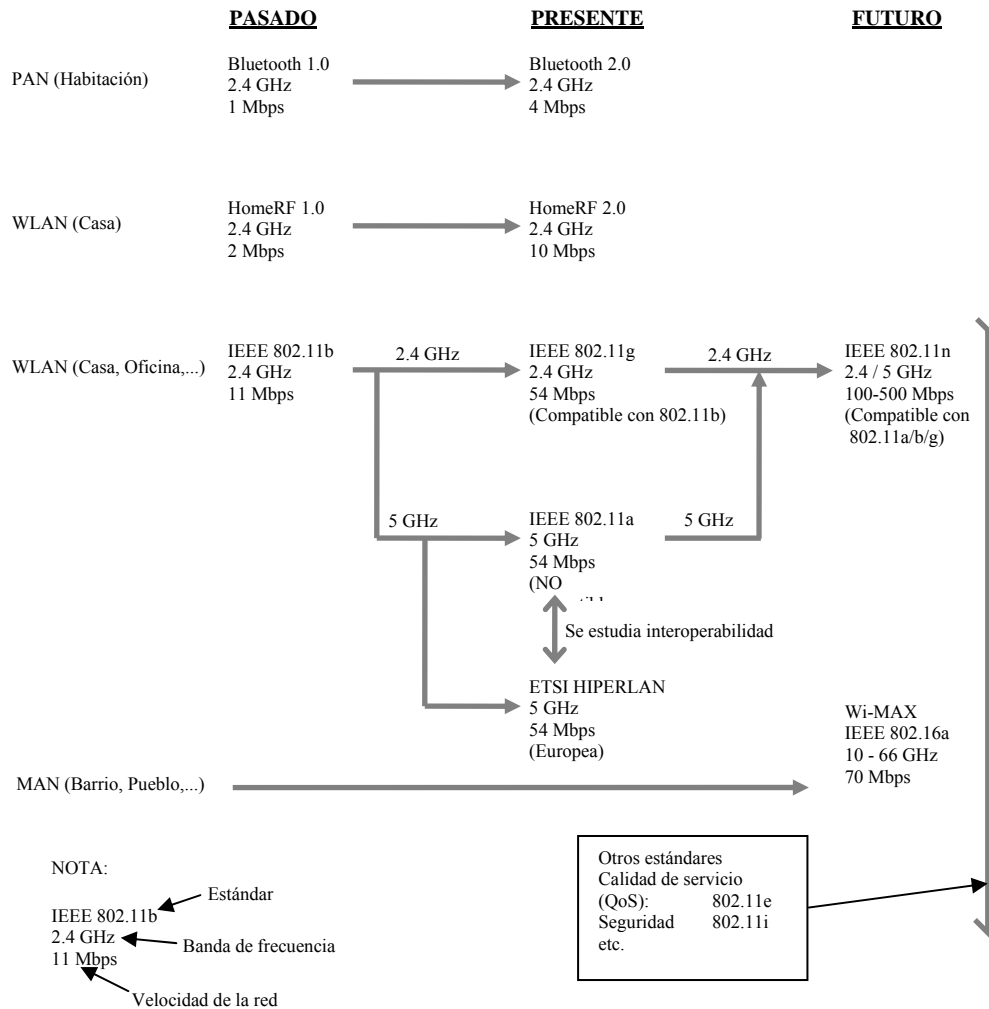


Figura 3 Evolución de redes inalámbricas

Wi-MAX (que opera en la frecuencia de 10 a 66 GHz), es un reemplazo inalámbrico para la conexión de cableado de banda ancha, particularmente en zonas rurales gracias a su rápido despliegue con estaciones base de muy amplia cobertura. Además, puede transmitir y recibir datos a 70 Mbps, 35 veces la velocidad de Línea de Abonado Asimétrica Digital (ADSL) típica, o 3,5 veces la velocidad de ADSL2+, y por un precio equiparable a ésta.

Una de las razones de la popularización de la tecnología inalámbrica ha sido su efectiva y adecuada estandarización, pese a la “complejidad” que ha entrañado el estándar 802.x; de hecho, Wi-MAX sigue esta numeración: es el estándar 802.16a. Su nombre completo es “Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems” y ha sido diseñado para que también pueda ser compatible con los estándares europeos, algo que no ocurrió con 802.11a, lo que retrasó su adopción.

El European Telecommunications Standards Institute (ETSI), organización independiente con base en Francia, y que agrupa a 688 miembros de 55 países, lo ha considerado también dentro de su especificación HiperMAN (por High Performance

Radio Metropolitan Area Networks) para redes inalámbricas que operan a menos de 11 GHz.

### Extensiones de Estándares Inalámbricos.

Otras extensiones del 802.11 son:

- **802.11d**  
Constituye un complemento al nivel de control de Acceso al Medio (MAC) en 802.11 para proporcionar el uso, a escala mundial, de las redes WLAN del estándar 802.11. Permitirá a los puntos de acceso comunicar información sobre los canales de radio admisibles, con niveles de potencia aceptables, para los dispositivos de los usuarios.
- **802.11e**  
Su objetivo es proporcionar soporte de QoS (Calidad de Servicio) para aplicaciones de redes LAN. Se aplicará a los estándares físicos a, b y g de 802.11. La finalidad es proporcionar claves de servicio con niveles gestionados de QoS para aplicaciones de datos, voz y vídeo.
- **802.11f**  
Inter-Access Point Protocol (IAPP) Su objetivo es lograr la interoperabilidad de Puntos de Acceso (AP) dentro de una red WLAN multi-proveedor. El estándar define el registro de Puntos de Acceso (AP) dentro de una red y el intercambio de información entre dichos Puntos de Acceso cuando un usuario se traslada desde un punto de acceso a otro.
- **802.11h**  
Dynamic Frequency Selection and Transmit Power Control mechanisms  
El objetivo es cumplir los reglamentos europeos para redes WLAN a 5 GHz. Los reglamentos europeos para la banda de 5 GHz requieren que los productos tengan control de la potencia de transmisión (TPC) y selección de frecuencia dinámica (DFS). El control TPC limita la potencia transmitida al mínimo necesario para alcanzar al usuario más lejano. DFS selecciona el canal de radio en el punto de acceso para reducir al mínimo la interferencia con otros sistemas, en particular el radar.
- **802.11i**  
Se refiere al objetivo más frecuente del estándar 802.11, la seguridad. Se aplicará a los estándares físicos a, b y g de 802.11. Proporciona una alternativa a la Privacidad Equivalente Cableada (WEP) con nuevos métodos de encriptación y procedimientos de autenticación. IEEE 802.1x constituye una parte clave de 802.11i.

### Otros estándares no Wi-Fi

Con una presencia muy limitada Open Air, opera en la frecuencia de 2.4Ghz y puede alcanzar velocidades de hasta 1.6 Mbps. En 1.996 se creó WLI Forum (Wireless LAN Interoperability) para apoyar la norma.

HiperLAN es otra familia de estándares que soporta velocidades de hasta 24Mbps., y opera en la frecuencia de 5 Ghz. Incorpora parámetros específicos de calidad de servicio que dan prioridad a determinado el tráfico de la red.



Swap es otro estándar inalámbrico, orientado al mercado doméstico. Está inspirado en la norma de telefonía inalámbrica DECT (Digital European Cordless Telephone) y en 802.11.

Bluetooth es el estándar más extendido. Opera en la frecuencia de 2,4 Ghz., y su velocidad máxima es de 1 Mbps. Aunque originalmente estaba concebido para sincronizar datos entre dispositivos, se está intentando posicionarlo como sistema de red inalámbrico. Por su configuración el alcance de las ondas es muy reducido (10 metros) aunque aumentando la potencia de transmisión (Clase 1) puede llegar teóricamente hasta los 100 metros.

La versión 1.2 de Bluetooth, permite que coexistan redes Bluetooth y WiFi en el espectro de los 2.4 GHz, sin interferencia entre ellos. Para ello, se usa la técnica "Adaptive Frequency Hopping (AFH)", que ejecuta una transmisión más eficiente y un encriptamiento más seguro.

### 2.1.2 Redes Locales Inalámbricas (WLAN)

Una red de área local inalámbrica o WLAN (Wireless LAN) utiliza la tecnología de Radio frecuencia (RF) que, en lugar de los tradicionales y molestos cables, utiliza el aire como medio de comunicación mediante la transmisión de ondas electromagnéticas.



Figura 4 Ejemplo de red inalámbrica sencilla

Las redes locales inalámbricas más que una sustitución de las LANs convencionales son una extensión de las mismas, ya que permite el intercambio de información entre los distintos medios en una forma transparente al usuario, minimizando la necesidad de establecer una conexión física cableada y ofreciendo al usuario conexión de datos de banda ancha y movilidad.

En este sentido, el objetivo fundamental de las redes WLAN es el de proporcionar las facilidades no disponibles en los sistemas cableados y formar una red total donde coexistan los dos tipos de sistemas, enlazando los diferentes equipos o terminales móviles asociados a la red.

Este hecho proporciona al usuario una gran movilidad sin perder conectividad. El atractivo fundamental de este tipo de redes es la facilidad de instalación y el ahorro que supone la supresión del medio de transmisión cableado. Aun así sus prestaciones son menores en lo referente a la velocidad de transmisión

que se sitúa entre los 2, 11 ó 54 Mbps frente a los 10, 100 ó los 1000 Mbps ofrecidos por una red convencional actual.

Las redes inalámbricas son la alternativa ideal para hacer llegar una red tradicional a lugares donde el cableado no lo permite. En general las WLAN se utilizarán como complemento de las redes fijas.

### 2.1.3 Ámbito de aplicación

Las aplicaciones de las redes de área local inalámbricas que podemos encontrar actualmente son muy variadas:

- Entornos difíciles de cablear. Implementación de redes de área local en **edificios históricos**, de difícil acceso y en general en entornos donde la solución cableada es inviable.
- Posibilidad de **reconfiguración de la topología** de la red sin añadir costes adicionales. Esta solución es muy típica en entornos cambiantes que necesitan una estructura de red flexible que se adapte a estos cambios.
- Redes locales para **situaciones de emergencia o congestión de la red cableada**.
- Entornos en los que se debe permitir el acceso a la información mientras el usuario se encuentra en **movimiento** y en **tiempo real**. Por ejemplo en hospitales, fábricas, almacenes...
- Generación de **grupos de trabajo eventuales y reuniones ad-hoc**. En estos casos no valdría la pena instalar una red cableada. Con la solución inalámbrica es viable implementar una red de área local aunque sea para un plazo corto de tiempo (exposiciones, acontecimientos deportivos, zonas catastróficas,...).
- En **ambientes industriales** con severas condiciones ambientales este tipo de redes sirve para interconectar diferentes dispositivos y máquinas.
- Interconexión de redes de área local que se encuentran en **lugares físicos distintos**. Por ejemplo, se puede utilizar una red de área local inalámbrica para interconectar dos o más redes cableadas de área local situadas en dos edificios distintos.
- Actualmente se están desplegando las denominadas **Zonas IP**, que son lugares públicos donde las WLAN ofrecen conexión a Internet: aeropuertos, estaciones de ferrocarril, auditorios de congresos, hoteles y otros lugares públicos.

### 2.1.4 Ventajas sobre las LAN cableadas

Enumeramos algunas de las ventajas que supone la utilización de redes inalámbricas.

#### Facilidad de instalación

Basta un dispositivo, un portátil o una agenda personal, equipado con tarjeta inalámbrica PCMCIA y un nodo de acceso de red. Además las redes inalámbricas se han simplificado en los últimos tiempos tanto en lo referente a la configuración como al uso.

## **Movilidad**

Sin cables, esta es la ventaja más clara. Además su reducida cobertura puede ampliarse a través de antenas hasta 50 Kilómetros o más. La movilidad se está extendiendo ahora a los TabletPC y a las computadoras PDA, o tipo agenda. Los usuarios tienen acceso a los datos en cualquier lugar y en cualquier momento lo que proporciona un aumento potencial de productividad y servicio sobre las LAN tradicionales.

## **Superior ancho de banda**

El estándar 802.11b permite velocidades de 11 Mbps. Este hecho ha provocado que ISP's de varios países comercialicen conexiones a Internet a través de este medio. Otros estándares de la misma familia, el 802.11a y el 802.11g alcanzan transferencias de 54 Mbps.

## **Libre utilización de la frecuencia de 2.4 Ghz**

Esta frecuencia, utilizada por el estándar 802.11 b, es de uso libre en España. Cualquiera puede crear su propia red sin necesidad de solicitar licencia alguna. Tan sólo es necesaria una autorización C de la CMT para proveer de servicios de Internet a través de WI-FI. Sin embargo en otros países europeos existen numerosas restricciones para la ocupación del espacio radioeléctrico.

## **Reducción de costes**

Evita el tendido de cables y costosas instalaciones. Por otra parte, tanto los puntos de acceso como las tarjetas PCMCIA tienen un coste relativamente asequible. Además los proveedores WI-FI pueden ofrecer acceso de banda ancha a un precio muy inferior al del acceso tradicional. Si se compara con el coste de implantación de UMTS, la ventaja competitiva de Wi-Fi resulta inmensa.

## **Velocidad simétrica**

A diferencia del ADSL, Wi-Fi es bidireccional, pudiendo recibir y enviar datos a la misma velocidad. Es por tanto útil para prestar una gran variedad de servicios que requieren idéntico ancho de banda para recepción y para envío de datos.

## **Complemento perfecto de redes tradicionales con cableado**

Con la colocación de puntos de acceso conectados a la red corporativa, cualquier empleado situado en el radio de acción (en un edificio más que suficiente) tiene acceso desde su portátil a los datos de la empresa sin necesidad de estar ligado a una conexión fija. Con ello se consigue la movilidad dentro de la oficina, lo que ahora mismo se considera fundamental en las empresas.

## **Cobertura en zonas sin infraestructuras de telecomunicaciones**

Wi-Fi posibilita el acceso a Internet de banda ancha a explotaciones, núcleos rurales, empresas o lugares que hasta la fecha por distintas razones han quedado al margen del despliegue de otras infraestructuras de telecomunicaciones (ADSL, Cable o incluso línea telefónica).

## **Funcionamiento sin errores**

En 802.11b y 802.11g, los dispositivos se comunican siempre a la mayor velocidad soportada que sea posible. Si la intensidad de la señal o las interferencias están degradando los datos, los dispositivos cambiarán su velocidad, disminuyendo a valores más bajos que no provoquen errores. Aunque esto pueda significar una reducción de la velocidad permite que la red siga funcionando.

## **Escalabilidad**

Puede aumentarse sin límite y de forma paulatina la cobertura de la red y su capacidad de transmisión.

### **2.1.5 Inconvenientes**

Entre los inconvenientes, se pueden destacar los siguientes.

#### **Alcance limitado**

Las áreas que WI-FI puede cubrir en edificios pueden llegar a distancias comprendidas entre los 75 y 120 metros. Los forjados de los edificios representan un problema importante para la transmisión a través de WI-FI. En áreas abiertas el alcance puede llegar a 300 metros. Esta carencia en la cobertura puede paliarse mediante la interconexión a través de antenas.

#### **Seguridad**

Sin duda su punto más débil. En primera instancia son inseguras en si mismas dado que el medio de transporte es el aire. Además el sistema de cifrado que se utiliza en redes inalámbricas (cifrado WEP- Wired Equivalent Privacy) está basado en algoritmos de cifrado de 40 bits. Actualmente están desarrollados sistemas de cifrado de 128 bits propios de las redes con hilos (WEP2). Existen otros sistemas de cifrado más seguros, aunque todavía no están suficientemente extendidos, ya sea por desconocimiento, como por incompatibilidad de dispositivos que no los soportan. Por otra parte, muchos usuarios (tanto particulares como empresariales) están acostumbrados a su utilización sin sistema de seguridad alguno, lo que puede ocasionar graves problemas, especialmente patentes en las intrusiones en intranets. Para llevar a cabo el ataque, tan sólo se necesitaría una pequeña antena. Además, estudios de diversas universidades americanas han demostrado que las señales pueden ser interceptadas desde más de 40 Km. Indicar asimismo, que existen en el mercado programas gratuitos como AirSnort, que escuchan y descubren las claves.

Desde que comenzó su implantación se está mejorando constantemente los algoritmos de encriptación de datos anteriores. Aunque hace ya varios años que se desvelaron las vulnerabilidades del protocolo WEP, razón por la que fue sustituido por WPA basado en TKIP, que meses más tarde también resultó tener importantes carencias. Esta nueva especificación utiliza el algoritmo de cifrado AES (Advanced Encryption Standard), un mecanismo extremadamente seguro que mereció en su día la aprobación del Instituto NIST (National Institute of Standards and Technology). WPA2 (WiFi Protected Access 2) se basa en 802.11i, y como tal constituye la propuesta de la WiFi Alliance para un mercado muy convulsionado por las muchas vulnerabilidades descubiertas en los protocolos de seguridad utilizados en las redes inalámbricas. Por supuesto, esta nueva versión es compatible con WPA.

No cabe duda de que la llegada de 802.11i (o WPA2) debe ser acogida por todos con entusiasmo debido al elevado nivel de seguridad que ofrece. Aun así, es necesario tener en cuenta que el algoritmo de cifrado AES requiere unas condiciones y una exigencia al hardware bastante alta, lo que significa que algunas controladoras inalámbricas antiguas no serán capaces de satisfacer los requisitos de este estándar.

### **Ancho de banda compartido**

Los usuarios conectados a través de un mismo punto, comparten el ancho de banda, por lo cual la velocidad teórica comentada, puede reducirse de forma considerable si no se ha realizado un correcto dimensionado de las conexiones. La velocidad obtenida está por tanto supeditada al número de usuarios conectados.

### **Posibles interferencias**

Wi-Fi en las versiones más extendidas (802.11b y 802.11g) trabaja en la frecuencia de 2.4 Ghz. Casi todos los productos WI-FI mencionan las posibles interferencias en el ámbito doméstico con los populares microondas, sin embargo en múltiples experimentos se ha comprobado que las interferencias con tales aparatos no se manifiestan. Otro posible punto de interferencia podría surgir con los dispositivos conforme a otros estándares como Bluetooth, que operan en la misma frecuencia, aunque los respectivos consorcios de normalización aspiran a solucionar estos problemas. WI-FI a través del estándar 802.11a, trabaja en la frecuencia de entre 5,15 y 5,35 Ghz. y son patentes los problemas de interferencias, fundamentalmente con las redes de satélites y redes militares. Este espectro está sumamente saturado en EE.UU. y desde el Gobierno americano, se buscan soluciones para que sus sistemas de defensa liberen parte del espectro.

### **Posibles repercusiones sobre la salud**

No existen conclusiones claras al respecto, por la frecuencia utilizada, la banda de 2.4 Ghz., podría tener consecuencias de calentamiento (similar a los microondas). Pero la potencia de emisión es considerablemente inferior a la de sistemas como el de la telefonía móvil. Mientras una tarjeta inalámbrica emite radiaciones de 30 milivatios de potencia, los móviles alcanzan radiaciones 20 veces superiores.

## Confusión debida a la multiplicidad de estándares

Si bien el futuro de WI-FI es muy prometedor, todavía no esta disponible un chipset (conjunto de chips que realizan todas las funciones básicas de cualquier placa base), que integre los estándares existentes. Los fabricantes están trabajando en este sentido y es muy probable la integración en breve tiempo.

## Difícil uso simultáneo en múltiples países

En Europa se presenta esta dificultad por la existencia de roaming entre proveedores.

### 2.1.6 Topología y configuraciones

La versatilidad y flexibilidad de las redes inalámbricas es el motivo por el cual la complejidad de una LAN implementada con esta tecnología sea tremendamente variable. Esta gran variedad de configuraciones ayuda a que este tipo de redes se adapte a casi cualquier necesidad.

Estas configuraciones se pueden dividir en dos grandes grupos, las redes *Peer to Peer* y las que utilizan *Puntos de Acceso*.

#### 2.1.6.1 Configuración Peer-to-Peer (Ad-Hoc)

También conocidas como redes ad-hoc, es la configuración más sencilla ya que en ella los únicos elementos necesarios son terminales móviles equipados con los correspondientes adaptadores para comunicaciones inalámbricas.

En este tipo de redes, el único requisito deriva del rango de cobertura de la señal, ya que es necesario que los terminales móviles estén dentro de este rango para que la comunicación sea posible. Por otro lado, estas configuraciones son muy sencillas de implementar y no es necesario ningún tipo de gestión administrativa de la red.

Un ejemplo sencillo de esta configuración se muestra en la siguiente ilustración.

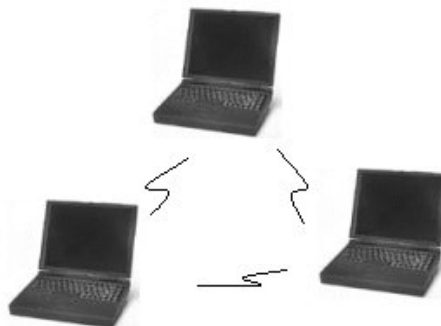


Figura 5 Arquitectura peer-to-peer

### 2.1.6.2 Configuración en modo Punto de Acceso

También conocidas como configuraciones en Modo Infraestructura, utilizan el concepto de celda, ya utilizado en otros sistemas de comunicación inalámbrica como la telefonía móvil. Una celda podría entenderse como el área en el que una señal radioeléctrica es efectiva. A pesar de que en el caso de las redes inalámbricas esta celda suele tener un tamaño reducido, mediante el uso de varias fuentes de emisión, es posible combinar celdas para cubrir de forma casi total un área más extensa.

La estrategia empleada para aumentar el número de celdas, y por lo tanto el área cubierta por la red, es la utilización de los llamados *Puntos de Acceso*, que funcionan como repetidores, y por tanto son capaces de doblar el alcance de una red inalámbrica, ya que ahora la distancia máxima permitida no es entre estaciones, sino entre una estación y un punto de acceso.

Los *Puntos de Acceso* son colocados normalmente en alto, pero solo es necesario que estén situados estratégicamente para que dispongan de la cobertura necesaria para dar servicio a los terminales que soportan. Un único punto de acceso puede soportar un pequeño grupo de usuarios y puede funcionar en un radio de al menos treinta metros y hasta varios cientos de metros.



Figura 6 Arquitectura basada en Puntos de Acceso

La configuración de *Punto de Acceso* es capaz de dotar a una red inalámbrica de muchas más posibilidades. Además del evidente aumento del alcance de la red, permite lo que se conoce como **roaming**, es decir que los terminales puedan moverse sin perder la cobertura y sin sufrir cortes en la comunicación. Esto representa una de las características más interesantes de las redes inalámbricas.

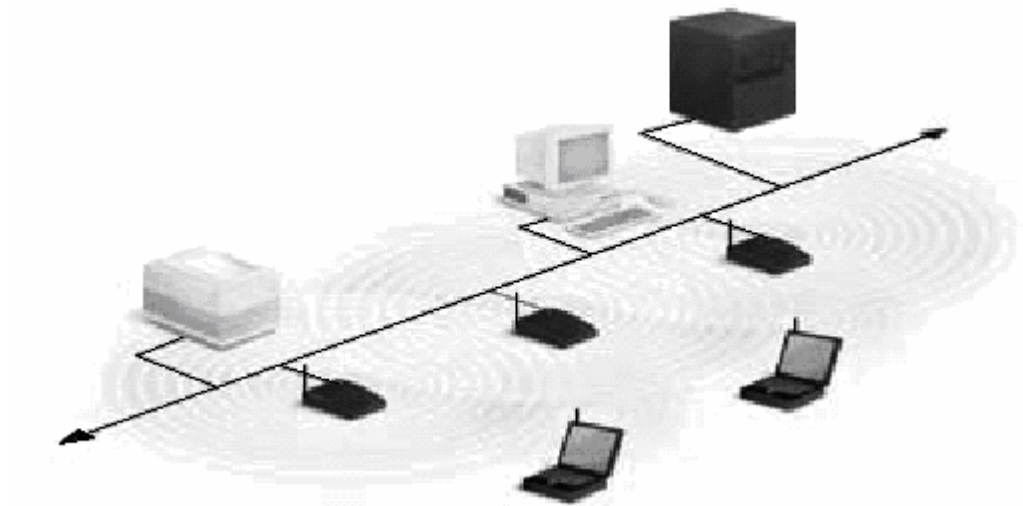


Figura 7 Utilización de varios Puntos de Acceso: terminales con capacidad de roaming

### 2.1.6.3 Otras configuraciones: Interconexión de redes

Las posibilidades de las redes inalámbricas pueden verse ampliadas gracias a la interconexión con otras redes, sobre todo con redes no inalámbricas. De esta forma los recursos disponibles en ambas redes se amplían.

Mediante el uso de antenas (direccionales u omnidireccionales) es posible conectar dos redes separadas por varios cientos de metros, como por ejemplo dos redes locales situadas en dos edificios distintos. De esta forma, una LAN no inalámbrica se beneficia de la tecnología inalámbrica para realizar interconexiones con otras redes, que de otra forma serían más costosas, o simplemente imposibles.

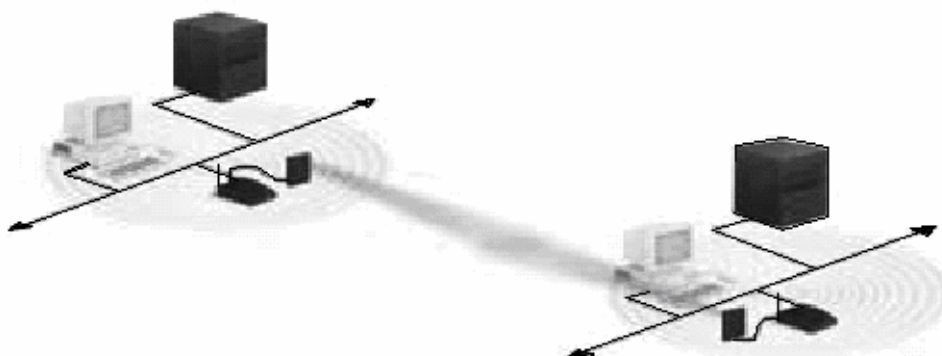


Figura 8 Interconexión de LAN mediante antenas direccionales

## 2.2 IEEE 802.11 y sus variantes

### 2.2.1 Introducción

En Junio de 1997 el IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) finalizó el estándar inicial para redes inalámbricas, IEEE 802.11. Este estándar



especifica una frecuencia de operación de 2.4 GHz con velocidades de transmisión de 1 y 2 Mbps. Desde esta versión inicial, el IEEE 802.11 WG (Working Group) ha llevado a cabo diferentes revisiones a través de diferentes grupos de trabajo especializados en distintas áreas.

Reconociendo la necesidad crítica de soportar velocidades de transmisión más altas, el grupo de trabajo B dentro del IEEE 802.11 WG ratificó en 1999 el estándar 802.11b para velocidades de hasta 11 Mbps. Con el 802.11b las WLANs proporcionan un rendimiento comparable a una LAN Ethernet tradicional de la época. La mayoría de las WLAN instaladas actualmente funcionan con arreglo a este estándar el cual es la base para la certificación WiFi proporcionada por la WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance). La certificación WiFi posibilita que productos con esta certificación, puedan usarse conjuntamente aunque sean de distintos fabricantes.

Aprobado junto al 802.11b, el IEEE 802.11a significará para el mercado de las redes inalámbricas lo que en su día representó la aparición de Gigabit Ethernet para las redes de cableado. Su mayor ventaja radica en que proporciona una velocidad en la transmisión de datos que oscila entre 6 y 54 Mbps. Para conseguir este salto en la velocidad se recurre a la denominada Multiplexación por División en Frecuencia Ortogonal (OFDM), una modalidad de la tecnología de Espectro Extendido.

El estándar 802.11a, utiliza la banda de los 5 GHz, una frecuencia distinta a los 2,4 GHz a los que recurre el 802.11b, lo que lo convierte en incompatible con las redes WiFi; si bien hay que añadir que pueden coexistir sin que surjan riesgos de interferencias. Sin embargo, un escenario compartido entre ambas tecnologías requiere ya la instalación de infraestructuras diferentes, lo que sin duda aumenta los inconvenientes y los costes, en buena medida derivados de la necesidad de un mayor número de puntos de acceso de 802.11a para disponer de una cobertura óptima.

El nuevo estándar ofrece mayor potencial de absorción de señal y atenuación, además de una menor resistencia multicanal en comparación con las redes basadas en los 2,4 GHz, en las que disminuye de forma considerable la señal según los entornos en que se produzca la comunicación.

El consumo eléctrico es otro factor que diferencia a ambos estándares. La mayor capacidad de transmisión de datos y el incremento de los requerimientos de la señal del 802.11a hace necesario un mayor consumo, lo que redundará a su vez en mayores costes procedentes de las baterías de los ordenadores portátiles.

Pero, sin duda, el mayor logro del 802.11a reside en el salto de velocidad hasta los 54 Mbps, desde los 11 Mbps. De hecho, diversas pruebas han demostrado la mayor eficiencia en la transmisión del nuevo protocolo con respecto a los anteriores. Cuando se comparó el 802.11b a 11 Mbps con el 802.11a a una velocidad limitada de 6 Mbps, lo cierto es que la capacidad de transmisión fue casi similar.

El estándar 802.11g, aprobado en junio de 2002, ofrece la ventaja de que se le considera la continuación natural del 802.11b, en cuanto a que puede operar con este

tipo de redes sin ningún contratiempo, ya que también utiliza la banda de 2,4 GHz; lo que le convierte en el siguiente paso de las redes WiFi. Al utilizar la tecnología OFDM, las redes locales inalámbricas basadas en el estándar 802.11g pueden alcanzar una velocidad máxima de 54 Mbps. Los equipos compatibles con 802.11g, así como los puntos de acceso inalámbricos compatibles, pueden proporcionar conectividad de red local inalámbrica para equipos basados en el estándar 802.11g y 802.11b.

Para establecer una conexión se necesitan 2 elementos básicos:

- Un adaptador para cada uno de los terminales a conectar.
- Una Estación Base o Punto de Acceso.

### Adaptador de red

Los adaptadores de red (uno por puesto de trabajo), adoptan el formato adecuado a cada terminal, (PCI, PCMCIA, PC Card, USB, embebidas en portátiles, en PDA,...). Implementan las funciones de estación, normalmente con antena integrada, permitiendo configuraciones ad-hoc o en modo infraestructura.

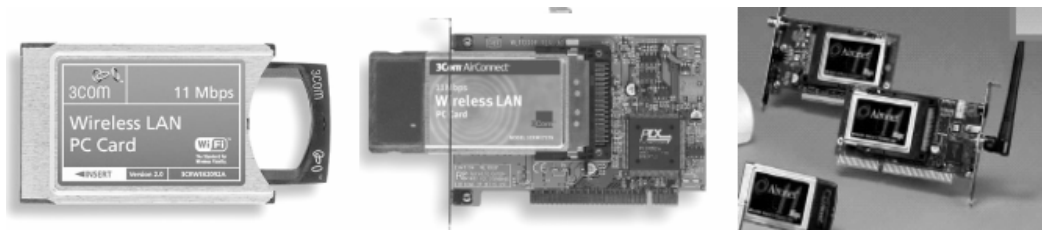


Figura 9 Adaptadores de red inalámbricos

### Estación base

La estación base cumple, además de la función de estación, dos funciones: la de concentrador o hub de una red convencional al que se conectan todos los terminales (sólo que en este caso la conexión se realiza sin cables), implementando funciones de control; y la de conexión a la infraestructura cableada llevando a cabo el puente con otras redes, como puede ser Internet. Por ello, la estación base cuenta habitualmente con al menos una conexión Ethernet 10/100 con posibilidad de funcionamiento en modo bridge transparente o en modo gateway (con router + DHCP + NAT). Muchos de ellos disponen opcionalmente de capacidad de alimentación por línea (in-line power) a través de la conexión Ethernet (PoE - Power over Ethernet), lo que facilita su instalación, ya que se alimentan a través del cable de red sin necesidad de hacer llegar corriente eléctrica por separado, sobre todo en sitios poco accesibles.



Figura 10 Punto de Acceso *Cisco Aironet 1100*

Al igual que el resto de estándar IEEE 802, el 802.11 se centra en las 2 capas inferiores del modelo OSI, la capa física y la capa de enlace. Por tanto, cualquier aplicación LAN, sistema operativo o protocolo, incluido TCP/IP y Novell Netware, serán compatibles por igual en una WLAN 802.11 como lo son en una LAN Ethernet.

- **Capa Física:** Espectro Ensanchado por secuencia directa (DSSS)
- **Capa de Enlace (MAC):** Adaptación de trama Ethernet + CSMA/CA (con Acknowledge)

El 802.11 original define la arquitectura básica, características y servicios de 802.11b. La especificación 802.11b afecta solo a la capa física, aumentando la velocidad de transmisión y proporcionado mecanismos para hacer la conexión más robusta. Se han realizado entre otras las siguientes modificaciones y añadidos en subcomités de 802.11:

- 802.11a: Hasta 54 Mbps en la banda de 5 GHz.
- 802.11b: Hasta 11 Mbps en la banda de 2.4 GHz (Wi-Fib).
- 802.11g: Hasta 54 Mbps en la banda de 2.4 GHz.
- 802.11d: Control de acceso al medio (MAC).
- 802.11e: Para poder definir QoS (calidad de servicio).
- 802.11f: Protocolo entre Access Point (IAPP).
- 802.11h: Selección automática de frecuencias y control de potencia.
- 802.11i: Incremento de niveles de seguridad en las comunicaciones.
- 802.11n: Velocidad mejorada hasta 100-500 Mbps.

### **Configuración Básica**

El estándar IEEE 802.11 define los dos tipos de configuración para las estaciones descritos anteriormente como peer-to-peer y punto de acceso, denominándolos respectivamente como *configuración en modo independiente* y *configuración en modo infraestructura*.

### 2.2.2 Arquitectura

El 802.11 está basado en una arquitectura celular donde el sistema se divide en celdas. Cada celda se denomina BSS (Basic Service Set) y es controlada por una estación base denominada AP (Access Point). La mayor parte de las instalaciones están compuestas por un conjunto de celdas formando una red con los APs conectados a un backbone. Este conjunto se denomina DS (Distribution System). El backbone de red puede ser una LAN cableada o incluso una WLAN. El conjunto completo de elementos descritos conforma una red única 802.11 para los niveles superiores del modelo de referencia OSI y se denomina ESS (Extended Service Set).

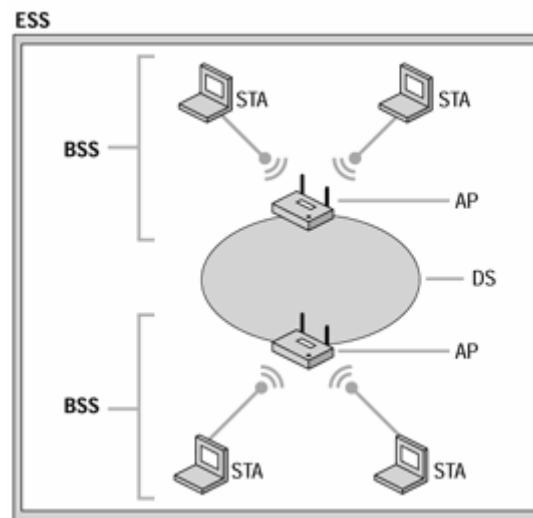


Figura 11 Arquitectura 802.11

### 2.2.3 Capas del IEEE 802.11

Como todos los estándar 802.x, el 802.11 cubre la capa física y la capa de enlace o MAC. En concreto el estándar define tres capas físicas diferentes: espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), espectro ensanchado por salto en frecuencia (FHSS) e infrarrojos. La capa de enlace o MAC es común para las 3 capas físicas, proporcionando una interfase única a los protocolos de capas superiores. MAC soporta funciones como la Fragmentación, Retransmisión y Aceptación de paquetes.

Data Link Layer	802.2		
	802.11 MAC		
PHY Layer	FH	DS	IR

Figura 12 Capas del IEEE 802.11

### 2.2.3.1 IEEE 802.11: Capa Física

La Capa Física de cualquier red define la modulación y la señalización características de la transmisión de datos. Como se ha mencionado anteriormente, los métodos de RF operan en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, ocupando aproximadamente 83 MHz de ancho de banda entre los 2,400 y 2,483 GHz. El nivel potencia máximo permitido en este rango de frecuencias varía de un país a otro según sus normas regulatorias. Así en Estados Unidos la FCC (Federal Communication Commission) limita la radiación de antena a 1W de potencia. En Japón el límite se fija en 10 mW por 1 MHz y en Europa está limitado a 100 mW.

IEEE 802.11 define tres posibles opciones para la elección de la capa física para la transmisión y recepción de tramas 802.11:

- Espectro expandido por secuencia directa o DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
- Espectro expandido por salto de frecuencias o FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)
- Luz infrarroja en banda base -sin modular-.

En cualquier caso, la definición de tres capas físicas distintas se debe a las sugerencias realizadas por los distintos miembros del comité de normalización, que han manifestado la necesidad de dar a los usuarios la posibilidad de elegir en función de la relación entre costes y complejidad de implementación por un lado, y prestaciones y fiabilidad por otra.

#### 2.2.3.1.1 Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS)

La tecnología de espectro ensanchado por salto en frecuencia (FHSS) consiste en transmitir una parte de la información en una determinada frecuencia durante un intervalo de tiempo llamado *dwelt time* inferior a 400 ms. Pasado este tiempo se cambia la frecuencia de emisión y se sigue transmitiendo a otra frecuencia. De esta manera cada tramo de información se va transmitiendo en una frecuencia distinta durante un intervalo muy corto de tiempo.

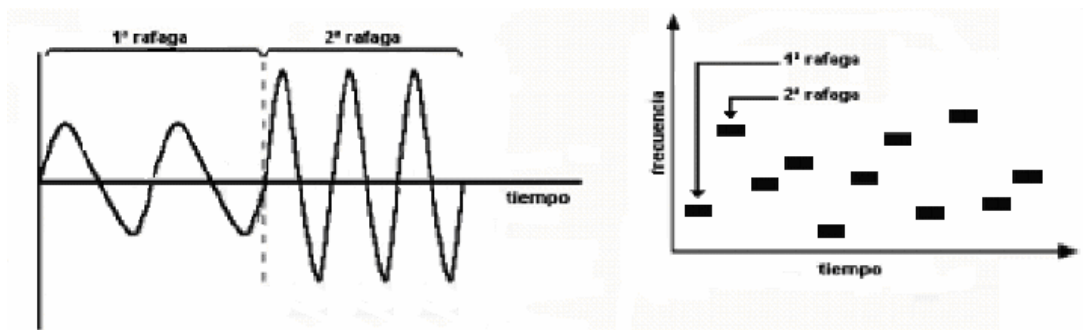


Figura 13 Gráfica de Codificación con Salto en Frecuencia

El orden en los saltos en frecuencia se determina según una secuencia pseudo aleatoria almacenada en unas tablas, que tanto el emisor y el receptor deben conocer.

Si se mantiene la sincronización en los saltos de frecuencias se consigue que, aunque en el tiempo se cambie de canal físico, a nivel lógico se mantiene un solo canal por el que se realiza la comunicación.

Esta técnica utiliza la zona de los 2.4GHz, la cual organiza en 79 canales con un ancho de banda de 1MHz cada uno. No obstante el número real de canales que son usados se regula por las autoridades competentes de cada país. El número de saltos por segundo está también regulado en cada país, así, por ejemplo, Estados Unidos fija una tasa mínima de saltos de 2,5 por segundo.

El estándar IEEE 802.11 define la modulación aplicable en este caso. Se utiliza la modulación en frecuencia FSK (Frequency Shift Keying), con una velocidad de 1 Mbps ampliable a 2 Mbps. En la revisión 802.11b del estándar, la velocidad también ha aumentado a 11Mbps.

### Formato de la trama FHSS

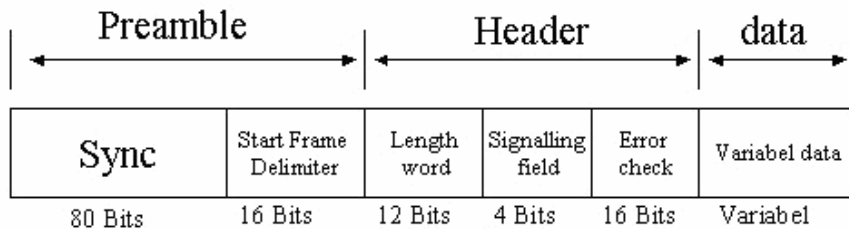


Figura 14 Formato de la trama FHSS

### Preámbulo

Contiene dos subcampos separados: el campo de preámbulo de sincronización (SYNC) y el delimitador de comienzo de trama (Start Frame Delimiter).

#### Sincronismo

Contiene 80 bits con un patrón alternativo de unos-ceros, comenzando con cero y terminando con uno. Se usa para detectar una señal potencialmente válida, seleccionar una de las antenas si se usa un sistema de diversidad y sincronizarse temporalmente.

#### Delimitador de comienzo de trama (SFD)

Contiene un patrón de 16 bits con patrón 0000 1100 1011 1101 que define el tiempo de la trama.

## **Cabecera**

Contiene 3 subcampos: Longitud de 12 bits, Señalización de 12 bits y Control de Errores de 16 bits.

### **Longitud**

Indica la longitud del campo de datos que puede ser de hasta 4095 octetos.

### **Señalización**

Campo de 4 bits que indica la velocidad de transmisión de los datos desde 1 Mbps a 4.5 Mbps en incrementos de 0.5 Mbps.

### **Control de errores (HEC)**

Campo de 16 bits para detección de errores que utiliza el polinomio generador CCITT CRC-16  $G(X) = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$ .

El preámbulo y la cabecera son siempre transmitidos a 1 Mbps. El resto de la trama es transmitido a la velocidad indicada en el campo de señalización. Para minimizar el efecto de las reflexiones multitrayecto el FHSS tiene un salto de distancia mínima entre frecuencias. Esto es debido a que las reflexiones del salto anterior tienen un efecto mínimo sobre el siguiente salto debido a que, transcurrido el retardo producido por la reflexión hasta llegar al receptor, éste se encontrará entonces esperando por información en una frecuencia diferente.

#### ***2.2.3.1.2 Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS)***

DSSS es el segundo nivel físico soportado por el 802.11 y el único especificado en el 802.11b, soportando velocidades de transmisión de 5.5 y 11Mbps. En el caso de Estados Unidos y Europa la tecnología DSSS utiliza un rango de frecuencias que va desde los 2,4 GHz hasta los 2,4835 GHz, lo que permite tener un ancho de banda total de 83,5 MHz. Este ancho de banda se subdivide en canales de 5 MHz, lo que hace un total de 14 canales independientes. Cada país está autorizado a utilizar un subconjunto de estos canales. En Europa existen 13 canales disponibles (excepto en Francia) aunque tan solo 3 están no solapados.

Con arreglo a 802.11 debe existir una separación de 30 MHz entre las frecuencias centrales de los canales si las celdas se solapan y/o son adyacentes para no causar interferencias. En 802.11b la separación se reduce a 25 MHz. Esto significa que pueden existir 3 celdas con zonas solapadas y/o adyacentes sin causar interferencias entre ellas, tal y como se muestra en la *Figura 15*.

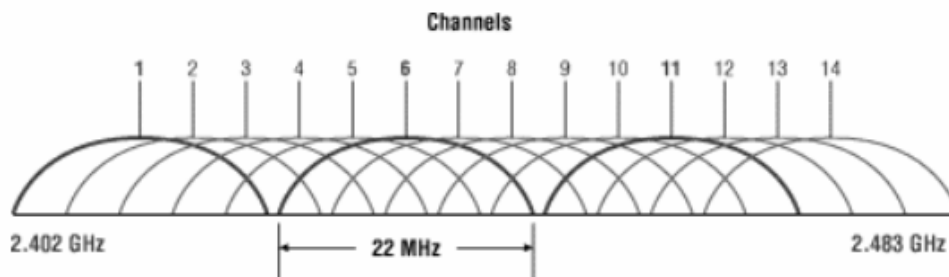


Figura 15 Canales DSSS

En configuraciones donde existan mas de una celda, éstas pueden operar simultáneamente y sin interferencias, siempre y cuando la diferencia entre las frecuencias centrales de las distintas celdas sea de al menos 30 MHz, lo que reduce a tres el número de canales independientes y funcionando simultáneamente en el ancho de banda total de 83,5 MHz.

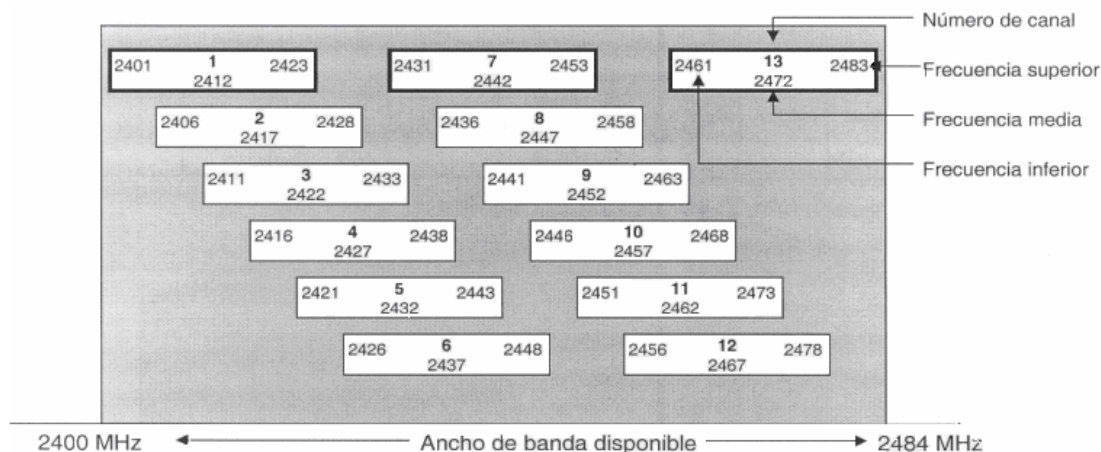


Figura 16 Tabla de frecuencias DSSS

El estándar 802.11b utiliza DSSS en la banda de 2.40 GHz y la estructura de canales diseñada en el estándar 802.11. La principal diferencia entre los dos estándares estriba en que 802.11b utiliza modulación CCK (Complimentary Code Keying) para las velocidades de 5.5 Mbps y 11 Mbps. El 802.11b soporta también las velocidades de 1Mbps y 2 Mbps, por lo que tiene compatibilidad hacia atrás con dispositivos 802.11.

### Modulación en DSSS para 802.11

En esta técnica se genera un patrón de bits redundante (señal de chip) para cada uno de los bits que componen la señal. Cuanto mayor sea esta señal, mayor será la resistencia de la señal a las interferencias. El estándar IEEE 802.11 recomienda un tamaño de 11 bits, pero el óptimo es de 100. En recepción es necesario realizar el proceso inverso para obtener la información original.

La secuencia de bits utilizada para modular los bits se conoce como secuencia de Barker (también llamado código de dispersión o Pseudo Noise). Es una secuencia



rápida diseñada para que aparezca aproximadamente la misma cantidad de 1 que de 0. Un ejemplo de esta secuencia es el siguiente:

+1 -1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1 -1 -1

Solo los receptores a los que el emisor haya enviado previamente la secuencia podrán recomponer la señal original. Además, al sustituir cada bit de datos a transmitir por una secuencia de 11 bits equivalente, aunque parte de la señal de transmisión se vea afectada por interferencias, el receptor aún puede reconstruir fácilmente la información a partir de la señal recibida.

A continuación podemos observar como se utiliza la secuencia de Barker para codificar la señal original a transmitir:

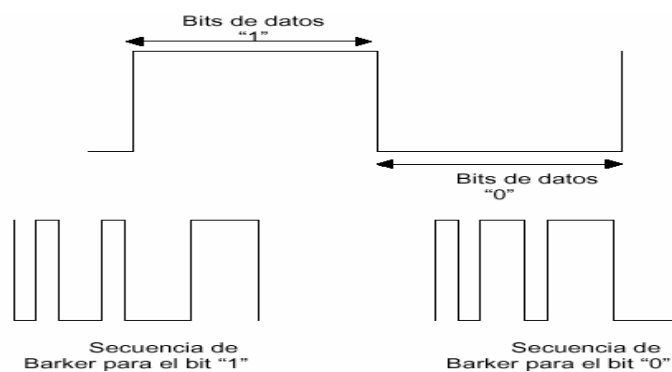


Figura 17 Codificación de Barker

Una vez aplicada la señal de chip, el estándar IEEE 802.11 ha definido dos tipos de modulación para la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS), la modulación DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) y la modulación DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), que proporcionan una velocidad de transferencia de 1 y 2 Mbps respectivamente.

### Modulación en DSSS para 802.11b (CCK)

La modulación CCK se utiliza en las velocidades de 5.5 Mbps y 11 Mbps. La longitud del patrón de bits redundante (señal de chip) es 8 y está basado en códigos complementarios. CCK obtiene un rendimiento óptimo en combinación con un receptor RAKE en entornos cerrados con multitrayectos por reflexión, y puede ser demodulada de manera eficiente.

### Propiedades de CCK.

Tomando la  $k$ -ésima palabra de un código como  $\mathbf{s}^k = [s^k_1, s^k_2, \dots, s^k_N]^T$  donde  $N$  es la longitud de palabra del código, y  $k = [1, 2, \dots, K]$ .

La autocorrelación aperiódica de las palabras del código viene dada por:

$$R_{kk} [j] = \sum_{i=1}^{N-j} s_i^k s_{i+j}^k \quad (1)$$

Un par de palabras del código son complementarias si cumplen la siguiente propiedad:

$$\sum_{k=1}^2 R_{kk} [j] = \begin{cases} 0 & \text{para } j \neq 0 \\ 2N & \text{para } j = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Un conjunto de k palabras se considera complementario si y solo si satisface la siguiente ecuación:

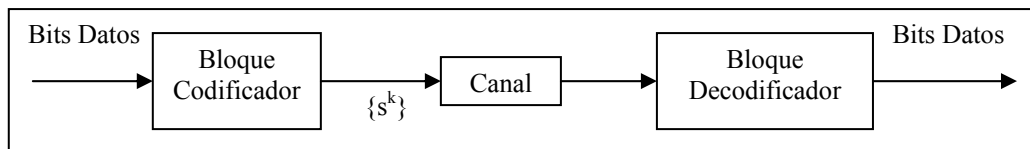
$$\sum_{k=1}^k R_{kk} [j] = \begin{cases} 0 & \text{para } j \neq 0 \\ KN & \text{para } j = 0 \end{cases} \quad (3)$$

El código de CCK está definido por un conjunto de 256 palabras de 8 bits especificadas por la siguiente ecuación:

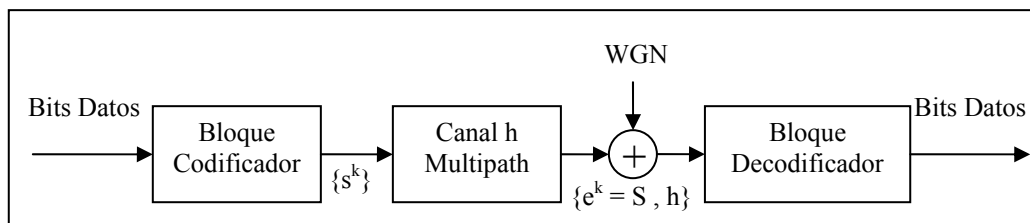
$$C = [e^{j(\phi_1+\phi_2+\phi_3+\phi_4)}, e^{j(\phi_1+\phi_3+\phi_4)}, e^{j(\phi_1+\phi_2+\phi_4)}, -e^{j(\phi_1+\phi_4)}, e^{j(\phi_1+\phi_2+\phi_3)}, e^{j(\phi_1+\phi_3)}, -e^{j(\phi_1+\phi_2)}, e^{j(\phi_1)}]$$

Donde  $\phi_i \in \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$  para  $i=1..4$ .

Este conjunto se considera complementario ya que cada elemento tiene un elemento pareja que le complementa el cual también pertenece al conjunto. Además el conjunto satisface la ecuación (3) para la totalidad de sus 256 elementos. Las siguientes figuras representan el sistema de codificación.



Sistema de codificación de bloques con canal genérico



Sistema de codificación de bloques con canal multipath

Figura 18 Sistemas de codificación de bloques

## Formato de la trama DSSS

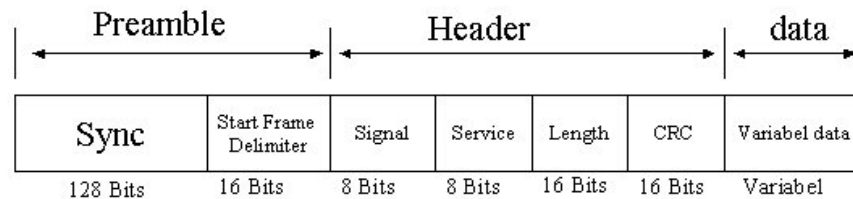


Figura 19 Formato de la trama DSSS

Al igual que en FHSS el preámbulo y la cabecera se transmiten siempre a 1 Mbps y el campo de señalización indica la velocidad de transmisión de los datos. En el 802.11b este campo soporta velocidades mayores que el original de 1 y 2 Mbps (5,5 Mbps y 11 Mbps).

### Sincronismo

Contiene una codificación de 128 bits que garantiza la sincronización previa del receptor.

### Delimitador de comienzo de trama (SFD)

Señaliza el comienzo de la trama real después del preámbulo.

### Señal

Indica a la capa física que tipo de modulación se utilizara en la transmisión. La velocidad será igual al valor de este campo multiplicado por 1000Kbps.

### Servicio

Reservado para usos futuros.

### Longitud

Entero sin signo de 16 bits que indica el número de microsegundos requerido para transmitir los datos.

### CRC

Los campos de cabecera están protegidos por una secuencia de verificación de trama CRC-16.

### 2.2.3.1.3 Infrarrojo

La verdad es que IEEE 802.11 no ha desarrollado todavía en profundidad esta área y solo menciona las características principales de la misma:

- Entornos muy localizados, un aula concreta, un laboratorio, un edificio.
- Modulaciones de 16-PPM y 4-PPM que permiten 1 y 2 Mbps de transmisión.
- Longitudes de onda de 850 a 950 nanómetros de rango.
- Frecuencias de emisión entre  $3,15 \cdot 10^{14}$  Hz y  $3,52 \cdot 10^{14}$  Hz.

Las WLAN por infrarrojos son aquellas que usan el rango infrarrojo del espectro electromagnético para transmitir información mediante ondas por el espacio libre. Los sistemas de infrarrojos se sitúan en altas frecuencias, justo por debajo del rango de frecuencias de la luz visible. Las propiedades de los infrarrojos son, por tanto, similares a las que tiene la luz visible. De esta forma los infrarrojos son susceptibles de ser interrumpidos por cuerpos opacos pero se pueden reflejar en determinadas superficies.

Para describir esta capa física seguiremos las especificaciones del IrDA (Infrared Data Association) organismo que ha estado desarrollando estándares para conexiones basadas en infrarrojos.

Para la capa infrarroja tenemos las siguientes velocidades de transmisión:

- 1 y 2 Mbps Infrarrojos de modulación directa.
- 4 Mbps mediante Infrarrojos portadora modulada.
- 10 Mbps Infrarrojos con modulación de múltiples portadoras.

### **Clasificación**

De acuerdo al ángulo de apertura con que se emite la información en el transmisor, los sistemas infrarrojos pueden clasificarse en sistemas de corta apertura, también llamados de rayo dirigido o de línea de vista (line of sight, LOS) y en sistemas de gran apertura, reflejados o difusos (diffused).

- Los sistemas infrarrojos de corta apertura, están constituidos por un cono de haz infrarrojo altamente direccional y funcionan de manera similar a los controles remotos de las televisiones: el emisor debe orientarse hacia el receptor antes de empezar a transferir información, limitando por tanto su funcionalidad. Resulta muy complicado utilizar esta tecnología en dispositivos móviles, pues el emisor debe reorientarse constantemente. Este mecanismo solo es operativo en enlaces punto a punto exclusivamente. Por ello se considera que es un sistema inalámbrico pero no móvil, o sea que está más orientado a la portabilidad que a la movilidad.
- Los sistemas de gran apertura permiten la información en ángulo mucho más amplio por lo que el transmisor no tiene que estar alineado con el receptor. Una topología muy común para redes locales inalámbricas basadas en esta tecnología, consiste en colocar en el techo de la oficina un nodo central llamado punto de acceso, hacia el cual dirigen los dispositivos inalámbricos su información, y desde el cual ésta es difundida hacia esos mismos dispositivos.

La dispersión utilizada en los sistemas de gran apertura, hace que la señal transmitida rebote en techos y paredes, introduciendo un efecto de interferencia en el receptor, que limita la velocidad de transmisión (la trayectoria reflejada

llega con un retraso al receptor). Esta es una de las dificultades que han retrasado el desarrollo del sistema infrarrojo en la norma 802.11.

La tecnología infrarrojo cuenta con muchas características sumamente atractivas para utilizarse en WLANs: el infrarrojo ofrece un amplio ancho de banda que transmite señales a velocidades altas; tiene una longitud de onda cercana a la de la luz y se comporta como ésta (no puede atravesar objetos sólidos como paredes, por lo que es inherentemente seguro contra receptores no deseados); debido a su alta frecuencia, presenta una fuerte resistencia a las interferencias electromagnéticas artificiales radiadas por dispositivos hechos por el hombre (motores, luces ambientales, etc.); la transmisión infrarroja con láser o con diodos no requiere autorización especial en ningún país (excepto por los organismos de salud que limitan la potencia de la señal transmitida); utiliza un protocolo simple y componentes sumamente económicos y de bajo consumo de potencia, una característica importante en dispositivos móviles portátiles.

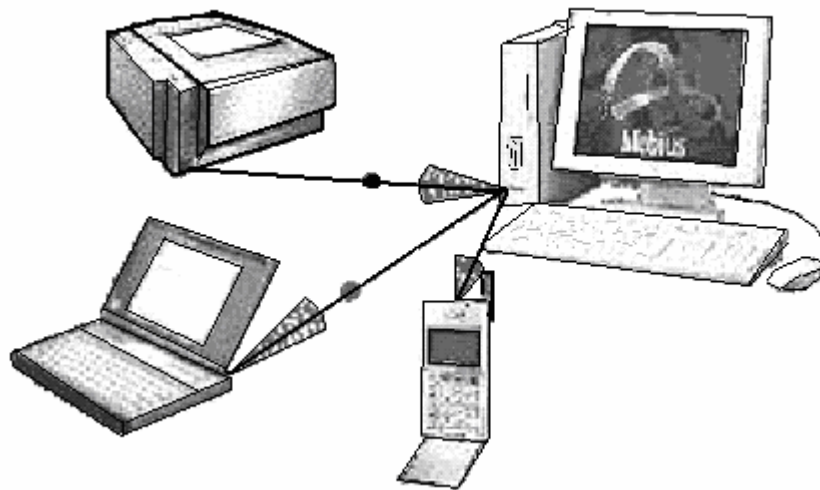


Figura 20 Transmisión por Infrarrojos

Entre las limitaciones principales que se encuentran en esta tecnología se pueden señalar las siguientes:

- Es sumamente sensible a objetos móviles que interfieren y perturban la comunicación entre emisor y receptor.
- Las restricciones en la potencia de transmisión limitan la cobertura de estas redes a unas cuantas decenas de metros.
- La luz solar directa, las lámparas incandescentes y otras fuentes de luz brillante pueden interferir seriamente la señal.

Las velocidades de transmisión de datos no son suficientemente elevadas y solo se han conseguido en enlaces punto a punto. Por ello, lejos de poder competir globalmente con las LAN de radio frecuencia, su uso está indicado más bien como apoyo y complemento a las LAN ya instaladas, cableadas o por radio, cuando en la aplicación sea suficiente un enlace de corta longitud punto a punto que, mediante la

tecnología de infrarrojos, se consigue con mucho menor coste y potencia que con las tecnologías convencionales de microondas.

### 2.2.3.1.4 Modulación por división ortogonal de frecuencias (OFDM)

Esta tecnología sólo está presente en 802.11a y en 802.11g como principal variación respecto a 802.11 y 802.11b. Se observa que la modulación pasa a ser OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), en vez de la clásica y más fiable hasta entonces CCK (Complimentary Code Keying); aunque esta norma pueda coexistir en los puntos de acceso 802.11g, conservando a su vez la banda de los 2.4Ghz (precedido de un CCK RTS).

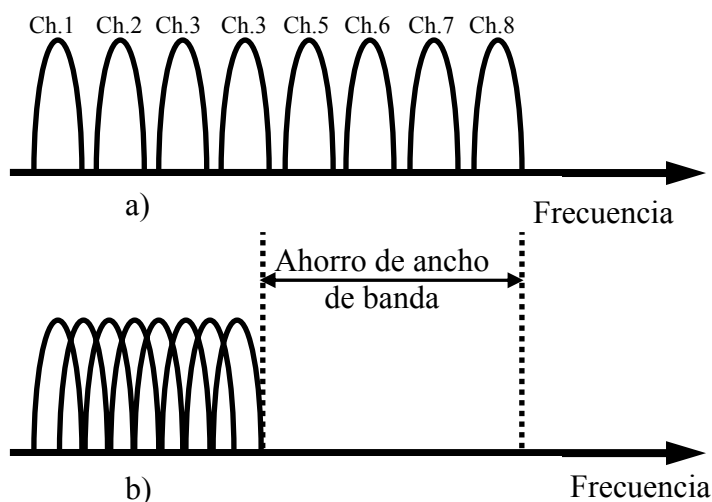


Figura 21 OFDM Orthogonal Frequency division Multiplexing

- a) Técnica multiportadora original.
- b) Modulación de portadoras ortogonales.

Durante los últimos años, se ha aceptado OFDM como tecnología de base para el 802.16a, que es un estándar de IEEE para redes de área metropolitana inalámbrica; y que puede proveer extensión inalámbrica para acceso de última milla de banda ancha en instalaciones de cable y DSL. El mismo cubre el rango de frecuencias de 2 a 11 GHz y alcanza hasta 50 kilómetros lineales, brindando conectividad de banda ancha inalámbrica sin necesidad de que exista una línea directa de visión a la estación de base. La velocidad de transmisión de datos puede llegar a 70 Mbps. Una estación de base típica puede albergar hasta seis sectores. La calidad de servicio está integrada dentro del MAC, permitiendo la diferenciación de los niveles de servicio.

El origen del OFDM está en las décadas de los 50 y 60 en aplicaciones de uso militar, y trabaja dividiendo el espectro disponible en múltiples subportadoras. La transmisión sin línea de visión ocurre cuando entre el receptor y el transmisor existen reflexiones o absorciones de la señal, lo que resulta en una degradación de la señal recibida, que se manifiesta por medio de los siguientes efectos: atenuación plana,

atenuación selectiva en frecuencia o interferencia inter-símbolo. Estos efectos se mantienen bajo control con el W-OFDM, que es una tecnología propietaria de WI LAN, quién recibió en 1994 la patente 5.282.222 para comunicaciones inalámbricas de dos vías y banda ancha OFDM (WOFDM). Esta patente es la base para los estándares 802.11a, 802.11g, 802.11a R/A, 802.16a, estándares para HiperMAN.

Los sistemas W-OFDM incorporan además: estimación de canal, prefijos cíclicos y códigos Reed-Solomon de corrección de errores. Wi-LAN introdujo su línea de productos BWS 3000 basada en W-OFDM en octubre del 2001. Actualmente ya ha introducido al mercado la tercera generación de equipos OFDM siendo el único proveedor mundial con una sólida experiencia en esta tecnología probada a través de la excelencia de sus productos.

Las tecnologías 802.11a y 802.11b definen una capa física diferente. Los emisores 802.11b transmiten a 2.4 GHz y envían datos a tasas tan altas como 11 Mbps usando modulación DSSS; mientras que los emisores 802.11a y 802.11g transmiten a 5 y 2,4 GHz respectivamente y envían datos a tasas de hasta 54 Mbps usando OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing o en español Multiplexación de División de Frecuencia Ortogonal).

OFDM es una tecnología de modulación digital, una forma especial de modulación multi-portadora (multi-carrier) considerada la piedra angular de la próxima generación de productos y servicios de radio frecuencia de alta velocidad, para uso tanto personal como corporativo. La técnica de espectro disperso de OFDM distribuye los datos en un gran número de portadoras (carriers) que están espaciados entre sí en distintas frecuencias precisas. Ese espaciado evita que los demoduladores vean frecuencias distintas a las suyas propias.

OFDM tiene una alta eficiencia de espectro y menor distorsión multi-ruta. Actualmente OFDM no sólo se usa en las redes inalámbricas LAN 802.11a y 802.11g, si no también en comunicaciones de alta velocidad por vía telefónica como las ADSL y en difusión de señales de televisión digital terrestre en Europa, Japón y Australia.

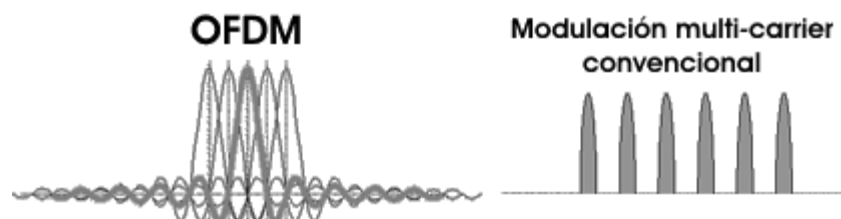


Figura 22 Espectro de OFDM solapado

### 2.2.3.2 IEEE 802.11: Capa de Enlace (MAC)

Diseñar un protocolo de acceso al medio para las redes inalámbricas es mucho más complejo que hacerlo para redes cableadas, ya que deben tenerse en cuenta las dos topologías de una red inalámbrica (modo independiente o infraestructura). Además se deben de tener en cuenta otros factores como son:

- Perturbaciones ambientales (interferencias).
- Variaciones en la potencia de la señal.
- Conexiones y desconexiones repentinas en la red.
- Roaming o itinerancia, nodos móviles que van pasando de celda en celda.

A pesar de todo ello la norma IEEE 802.11 define una única capa MAC (divida en dos subcapas) para todas las redes físicas, facilitando de este modo la fabricación en serie de chips. La principal función de esta capa es el control de acceso al medio, realizando igualmente funciones como fragmentación, encriptación, gestión de alimentación eléctrica, sincronización y soporte de roaming entre múltiples APs.

### **2.2.3.2.1 Mecanismos de Acceso básico CSMA/CA**

El estándar 802.11 utiliza como mecanismo de acceso básico el método CSMA (Carrier Sense Multiple Access) que trabaja del siguiente modo. La estación que desea transmitir “escucha” el medio de transmisión; si el medio está ocupado significa que otra estación está transmitiendo y por lo tanto debe retrasar su transmisión. Si el medio está libre durante un tiempo específico, llamado DIFS (Distributed Inter Frame Space) en el estándar, la estación está habilitada para transmitir.

Esta clase de métodos de acceso, denominados protocolos de acceso por contienda, son muy efectivos si la carga de uso del medio no es muy alta, ya que esto permitirá a las estaciones transmitir con un retardo mínimo. Hay que tener en cuenta además que pueden producirse colisiones debido a la posibilidad de que 2 estaciones “escuchen” el medio simultáneamente, detectando que esté libre e iniciando su transmisión al mismo tiempo.

El método de acceso más popular en redes cableadas es el CSMA/CD (Collision Detection) utilizado por el estándar IEEE 802.3 (Ethernet). Este método no puede aplicarse a redes inalámbricas debido a dos razones:

- Para implementar un mecanismo de detección de colisiones, se necesitarían dispositivos de radio full duplex capaces de transmitir y recibir simultáneamente, lo cual incrementaría significativamente el coste de los equipos.
- En una red cableada cualquier estación pueden “escuchar” al resto, mientras que en redes inalámbricas esto puede no cumplirse (nodo escondido).

El método que más se utiliza en redes inalámbricas es el CSMA/CA (Carrier-Sense, Multiple Access, Collision Avoidance). Este protocolo evita colisiones en lugar de descubrir una colisión, como el algoritmo usado en la 802.3. En una red inalámbrica es difícil descubrir colisiones. Es por ello que se utiliza el CSMA/CA y no el CSMA/CD debido a que entre el final y el principio de una transmisión suelen provocarse colisiones en el medio. En CSMA/CA, cuando una estación identifica el fin de una transmisión espera un tiempo aleatorio antes de transmitir su información, disminuyendo así la posibilidad de colisiones.



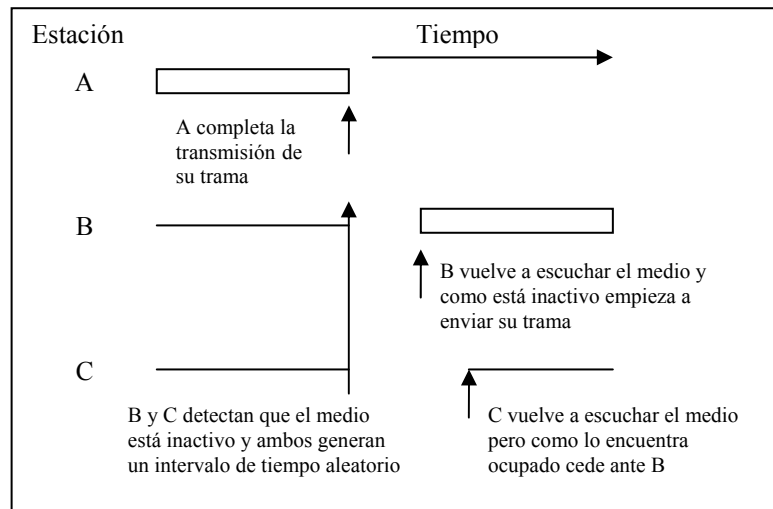


Figura 23 Método CSMA/CA

La capa MAC opera junto con la capa física probando la energía sobre el medio de transmisión de datos. La capa física utiliza un algoritmo de estimación de desocupación de canales (CCA) para determinar si el canal está vacío. Esto se cumple midiendo la energía RF de la antena y determinando la fuerza de la señal recibida. Esta señal medida es normalmente conocida como RSSI. Si la fuerza de la señal recibida está por debajo de un umbral especificado, el canal se considera vacío, y a la capa MAC se le da el estado del canal vacío para la transmisión de los datos. Si la energía RF está por debajo del umbral, las transmisiones de los datos son retrasadas de acuerdo con las reglas protocolares. El estándar proporciona otra opción CCA que puede comprobarse independientemente o con la medida RSSI. El sentido de la portadora puede usarse para determinar si el canal está disponible. Esta técnica es más selectiva ya que verifica que la señal es del mismo tipo de portadora que los transmisores del 802.11.

En comunicaciones inalámbricas, este modelo presenta todavía una deficiencia debida al problema conocido como de la terminal oculta (o nodo escondido).

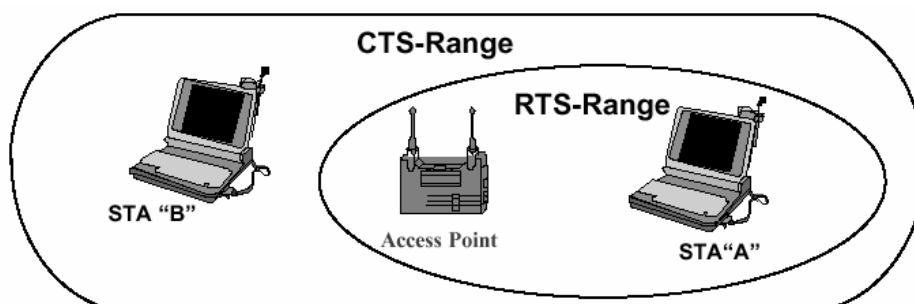


Figura 24 Ejemplo de nodo escondido

Un dispositivo inalámbrico puede transmitir con la potencia suficiente para que sea escuchado por un nodo receptor, pero no por otra estación que también desea transmitir y que por tanto no detecta la transmisión.

Para resolver este problema, la norma 802.11 ha añadido al protocolo de acceso CSMA/CA un mecanismo de intercambio de mensajes con reconocimiento positivo, al que denomina Reservation-Based Protocol, que es la 2ª subcapa MAC.

Cuando una estación está lista para transmitir, primero envía una solicitud (destino y longitud del mensaje) al punto de acceso (RTS - "request to send") quien difunde el NAV (Network Allocation Vector) -un tiempo de retardo basado en el tamaño de la trama contenido en la trama RTS de solicitud- a todos los demás nodos para que queden informados de que se va a transmitir (y que por lo tanto no transmitan); y cuál va a ser la duración de la transmisión.

Estos nodos dejarán de transmitir durante el tiempo indicado por el NAV más un intervalo extra de backoff (tiempo de retroceso) aleatorio. Si no encuentra problemas, responde con una autorización (CTS - "clear to send") que permite al solicitante enviar su trama (datos). Si no se recibe la trama CTS, se supone que ocurrió una colisión y los procesos RTS empiezan de nuevo.

Después de que se reciba la trama de los datos, se devuelve una trama de reconocimiento (ACK - ACKnowledged) notificando al transmisor que se ha recibido correctamente la información (sin colisiones).

Aún así permanece el problema de que las tramas RTS sean enviadas por varias estaciones a la vez, sin embargo estas colisiones son menos dañinas ya que el tiempo de duración de estas tramas es relativamente corto.

Este mismo protocolo también puede utilizarse si no existen dispositivos auxiliares en las redes ad-hoc, en este caso no aparecería la trama NAV.

#### **2.2.3.2.2 Seguridad**

En el estándar se proporcionan elementos de seguridad como una característica optativa para aquellos que puedan ser afectados por la escucha secreta, es decir, por el "físgoneo". Incluye dos aspectos básicos: autenticación y privacidad.

La seguridad de los datos se realiza por una compleja técnica de codificación, conocida como WEP (Wired Equivalent Privacy Algorithm). WEP se basa en proteger los datos transmitidos en el medio RF, usando clave de 64 bits y el algoritmo de encriptación RC4 (desarrollado por RSA Security Inc.).

La clave se configura en el punto de acceso y en sus estaciones (clientes wireless), de forma que sólo aquellos dispositivos con una clave válida puedan estar asociados a un determinado punto de acceso.

Cuando se habilita WEP, sólo se protege la información del paquete de datos y no protege el encabezamiento de la capa física, para que otras estaciones en la red puedan escuchar el control de datos necesario para manejar la red. Sin embargo, las otras estaciones no pueden distinguir las partes de datos del paquete. Se utiliza la

misma clave de autenticación para cifrar y descifrar los datos, de forma que sólo las estaciones autorizadas puedan traducir correctamente los datos.

### **2.2.3.2.3 Funcionalidad Adicional**

En las LAN inalámbricas la capa de MAC, además de efectuar la función de controlar el acceso al medio, desempeña otras funciones:

- Fragmentación
- Control de flujo
- Manejo de múltiples tasas de transmisión
- Gestión de potencia

En los diferentes tipos de LAN por cable es posible usar tramas grandes gracias a tasas de errores de bit bajos ( $10^{-9}$  a  $10^{-11}$ ). En las LAN inalámbricas, el multicamino y las interferencias pueden elevar considerablemente los valores de errores de bit ( $10^{-3}$  a  $10^{-5}$ ).

Para poder transmitir eficientemente por estos medios, hay que reducir el tamaño de las tramas. La capa MAC se encarga de fragmentar las tramas en otras más pequeñas antes de transmitir las por el medio inalámbrico. De la misma manera deberá ensamblar las tramas para obtener la trama original antes de entregarla a la capa superior.

También debe cumplir un control de flujo, cada vez que un segmento sea pasado a la capa física, deberá esperar que este sea transmitido antes de enviar el próximo segmento.

La gestión de la potencia se apoya en el nivel MAC para esas aplicaciones que requieren movilidad bajo el funcionamiento con baterías. En el protocolo se proporcionan características para que las estaciones portátiles pasen a "modo dormido" durante un intervalo de tiempo definido por la estación base.

## **2.2.4 Operativa básica en una WLAN**

Las 2 operativas más importantes que se producen en el funcionamiento de una WLAN son el método utilizado por una estación para conectarse a una celda y el soporte de roaming entre APs.

### **Conexión a una celda**

Existen 3 momentos en que una estación necesitará acceder a un BSS: después del encendido, al finalizar el sleep-mode o cuando entra en el área del BSS. La estación precisa obtener información de sincronización del AP (configuración en modo infraestructura) o de otra estación (configuración en modo independiente). La estación puede utilizar dos métodos para obtener esta información:

1. **Active Scanning** – En este método la estación trata de localizar el AP transmitiendo tramas de petición de sondeo, quedando a la espera de paquetes de respuesta de sondeo desde el AP.
2. **Passive Scanning** – En este método la estación se queda a la espera de recibir una trama Beacon del AP. La trama Beacon contiene la información de sincronización y proporciona a la estación la información que necesita.

El método utilizado por la estación dependerá de su consumo de energía y su propia operativa.

### **Proceso de autenticación y asociación**

Una vez que la estación ha localizado un AP y decide unirse a su BSS, debe iniciar un proceso de autenticación. Este proceso consiste en un intercambio de información entre el AP y la estación donde cada extremo prueba el conocimiento de una contraseña predefinida.

Realizado el proceso de autenticación, se inicia el proceso de asociación. La estación y el BSS intercambian información acerca de sus propias capacidades y el DSS toma conocimiento de la posición actual de la estación. Una estación no puede transmitir o recibir tramas de datos sin que el proceso de asociación haya concluido.

### **Itinerancia o Roaming**

Siempre que la red inalámbrica disponga de más de una celda es posible para los clientes inalámbricos desplazarse entre las áreas de cobertura de cada uno de ellos sin perder la conexión. Se entiende por Roaming el proceso de movimiento desde una celda o BSS a otra, sin pérdida de conexión.

El 802.11 no define explícitamente cómo debe ser implementado el roaming, pero define los métodos básicos para hacerlo posible. Esto incluye active/passive scanning y el proceso de reasociación; donde la estación que hace roaming desde un AP a otro, pasa a estar asociada al nuevo.

Para hacer posible el roaming las áreas de cobertura definidas por las celdas deben solaparse ligeramente. Si no hay solapamiento, al desplazarnos de un área a otra perderemos la conexión, aunque la recuperaremos de nuevo automáticamente al entrar en el área de cobertura de otro AP.

Para que el Roaming sea posible, todas las estaciones base deben utilizar el mismo nombre de red SSID y las mismas claves de encriptación WEP.

La legislación Europea permite la utilización de los Canales 1-13 de los definidos en el Estándar IEEE 802.11b. Para evitar la interferencia entre canales adyacentes, las estaciones base contiguas deben utilizar frecuencias separadas al menos 5 canales, por ejemplo:

1, 6, 11 ó bien 2, 7, 12 ó bien 3, 8, 13

Esta separación supone que un punto del espacio debe ser cubierto simultáneamente por un máximo de 3 estaciones base para evitar las interferencias con los canales adyacentes. Así, para cubrir áreas extensas con acceso inalámbrico, se deberá elegir una ubicación adecuada para cada estación base, utilizando una división del espacio por triangulación.

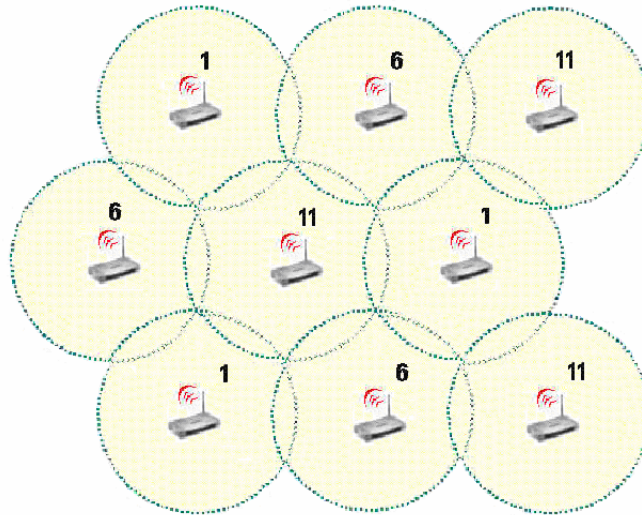


Figura 25 Cobertura completa con triangulación

## Sincronización

Mantener la sincronización del sistema con las estaciones es muy importante para llevar a cabo saltos sincronizados además de otras funciones como el ahorro de consumo energético. Esto se logra actualizando el reloj de las estaciones con arreglo al reloj de los APs, mediante las tramas Beacon, las cuales contienen el valor de reloj del AP en el momento de su transmisión.

### 2.2.5 Asignación del espectro Radioeléctrico

Como toda tecnología de radio, el WLAN utiliza espectro radioeléctrico, recurso escaso cuyo uso y asignación son globalmente regulados por diferentes organismos de ámbito internacional y nacional. La tecnología WLAN trabaja en las bandas de frecuencias de 2,4 y 5 GHz.

La banda de frecuencia de 2,4 GHz se encuentra dentro de las asignadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU – International Telecommunication Union) para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM – Industrial, Scientific and Medical). Los servicios de radiocomunicaciones que funcionan en estas bandas de frecuencia deben aceptar la interferencia resultante de estas aplicaciones, no pudiendo reclamar protección ni causar ellos mismo interferencia alguna. Las aplicaciones típicas son redes de área local inalámbricas, conexión de periféricos de ordenadores y datos en general, siempre para auto prestación.

En cuanto a la banda de 5 GHz, en Europa, la Conferencia Europea de Administraciones Postales y de Telecomunicaciones (CEPT) asignó en 1999 las bandas A y B para uso de WLAN, limitando el uso en la banda A, que se comparte con el Servicio Fijo por Satélite, al interior de los edificios. Asimismo, estableció el uso de mecanismo de selección dinámica de frecuencia (DFS) en al menos 330 MHz si se usan ambas bandas y en 255 MHz si sólo se usa la B, y el uso de mecanismos de control de potencia transmitida (TPC).

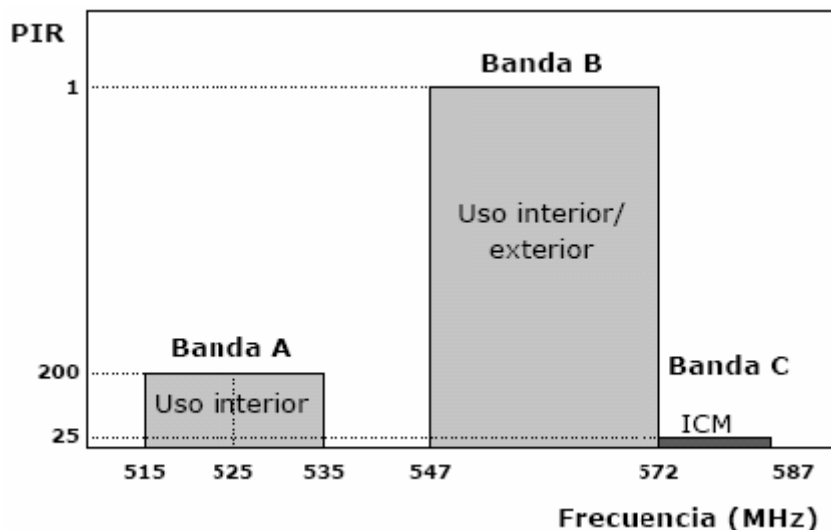


Figura 26 Asignación de la CEPT para la banda de 5 GHz.

La CEPT asignó la banda de 5725-5875 MHz para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM), como ocurre con la de 2,4 GHz.

La banda de 5 GHz ha sido objeto de discusión en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones, CMR2003 [CMR03]. La armonización global del espectro disponible para el uso de WLAN es fundamental en un escenario en el que existen diferencias considerables en cuanto al uso y potencias máximas de transmisión que los distintos países permiten.

País \ MHz	5150-5250	5250-5350	5470-5725	5725-5875
USA	50 mW interior	250 mW interior/exterior	No permitida	1 W interior/exterior en 5725-5825
Australia	200 mW interior	200 mW interior	No permitida	1 W interior/exterior
Francia	200 mW interior	200 mW / 100 mW (Con / Sin DFS) interior	No permitida	No permitida
Alemania	200 mW interior	200 mW	1 W	No permitida
Reino Unido	200 mW interior	200 mW interior	1 W interior/exterior	En discusión
Países escandinavos	200 mW	200 mW	1 W	No permitida
España	200 mW / 120 mW (Con / Sin DFS) interior	200mW interior	1 W interior/exterior	No permitida

Tabla 1 Comparativa asignación del espectro WLAN en la banda 5 GH

Como conclusiones de la CMR 2003 [CMR03], se ha resuelto la utilización de las bandas de 5150-5250, 5250-5350 y 5470-5725 MHz para la implementación

de sistemas de acceso inalámbrico, incluidas las redes radioeléctricas de área local (WLAN).

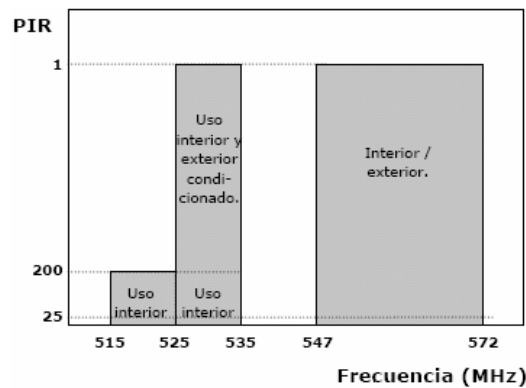


Figura 27 Conclusiones de la CMR-2003 en la banda de 5 GHz.

Respondiendo a la petición conjunta de los países europeos, se limita el uso de la banda de 5150-5250 a interior y se pide a las administraciones que tomen las medidas adecuadas para que la mayoría de las estaciones de 5250-5350 funcionen asimismo en interior, debido a que el uso exterior podría interferir con satélites, radares y sistemas de aeronavegación. La ITU continuará trabajando sobre técnicas de atenuación para evitar incompatibilidades y en la prueba de procedimientos de aplicación de selección dinámica de frecuencia (DFS).

## 2.3 Factores en la propagación inalámbrica

La *Figura 28* representa una perspectiva general de cuáles son los factores más importantes que afectan a la cobertura inalámbrica, y aunque en las imágenes aparezcan un punto de acceso WLAN y un portátil, son aplicables a cualquier modelo de propagación; aunque como veremos más adelante, algunos fenómenos se producen en mayor medida en redes indoor.

### 2.3.1 Antenas

Como se ve en la *Figura 28*, el tipo de antena va a influir en la comunicación en ambos extremos de la comunicación.

Una antena es un dispositivo generalmente metálico capaz de radiar y recibir ondas de radio; que adapta la entrada/salida del receptor/transmisor al medio. La antena convierte las ondas eléctricas entregadas por el emisor, en ondas electromagnéticas que se pueden transmitir por el espacio libre; y en el otro extremo, convierte las ondas electromagnéticas que recibe, en ondas eléctricas que entrega al receptor.

Básicamente su estructura consiste en un trozo de material conductor, al cual se le aplica una señal, y ésta es radiada por el espacio libre. Opera igualmente en sentido inverso, capturando la señal de radiofrecuencia del aire y entregándola posteriormente al receptor.

Las antenas juegan un papel vital en la definición del área de cobertura de una WLAN. Si se ignora su importancia los puntos de acceso podrían no conseguir los máximos ratios de efectividad y cobertura, lo cual puede incurrir en un aumento de costes al ser necesario un mayor número de puntos de acceso para cubrir el área requerida.

Una elección correcta de antena incrementa los niveles de cobertura de su celda produciendo una reducción de costes, al ser necesarios un menor número de puntos de acceso.




 <p>PUNTO DE ACCESO</p>		 <p>PC CARD</p>
<p><b>Tipo de Antena</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ganancia</li> <li>▪ Patrón de radiación</li> <li>▪ Efectos de la radiación</li> <li>▪ Perdidas</li> </ul> <p><b>Ubicación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Altura</li> <li>▪ Ángulo</li> <li>▪ Polarización</li> </ul> <p><b>Otros aspectos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Receptor RAKE</li> <li>▪ Ecuilibradores</li> <li>▪ Técnica de modulación</li> <li>▪ Movimiento</li> </ul>	<p><b>Obstáculos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Penetración</li> <li>▪ Reflexión</li> <li>▪ Difracción</li> <li>▪ Refracción</li> <li>▪ Dispersión</li> </ul> <p><b>Perdidas de propagación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Distancia</li> <li>▪ Frecuencia</li> </ul> <p><b>Interferencias</b></p> <p><b>Ruido</b></p>	<p><b>Tipo de Antena</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ganancia</li> <li>▪ Patrón de radiación</li> <li>▪ Efectos de la radiación</li> <li>▪ Perdidas</li> </ul> <p><b>Ubicación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Altura</li> <li>▪ Ángulo</li> <li>▪ Polarización</li> </ul> <p><b>Otros aspectos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Receptor RAKE</li> <li>▪ Ecuilibradores</li> <li>▪ Técnica de modulación</li> <li>▪ Movimiento</li> </ul>

Figura 28. Factores que afectan a la cobertura

### 2.3.1.1 Características de las antenas

#### Ancho de banda

El ancho de banda de la antena se define como el rango de frecuencias sobre las cuales la operación de la antena es "*satisfactoria*". Esto, por lo general, se toma entre los puntos de media potencia, pero a veces se refiere a las variaciones en la impedancia de entrada de la antena.

En WLANs las antenas tiene que estar sintonizadas para la banda de 2.4 GHz (802.11b/g) ó 5 GHz (802.11a). Una antena funcionará de modo eficiente sólo si su ancho de banda coincide con las frecuencias de radio utilizadas.



## Potencia

Las antenas operan con un determinado nivel de potencia entregado por el transmisor. En el caso de 802.11 se ajustan normalmente a 100mW que es la potencia máxima permitida en Europa para la emisión de puntos de acceso o NIC WiFi.

## Patrón de radiación

Es la representación gráfica de las propiedades de una antena, en coordenadas polares o rectangulares, de cómo distribuye la energía en el espacio.

Puede representar las intensidades de los campos (si se traza en términos de intensidad de campo eléctrico  $E$ ) o las densidades de potencia ( $P$ ) en varias posiciones angulares en relación con una antena.

La forma del patrón de radiación de una antena define su directividad. En la *Figura 29* se representa el diagrama de radiación en tres dimensiones de una antena yagi de seis elementos.

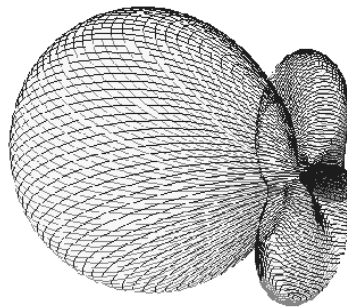


Figura 29 Patrón de radiación de una antena yagi

Algunas veces no nos interesa el diagrama de radiación en tres dimensiones, al no poder hacerse mediciones exactas sobre el; y lo que se suele hacer es un corte en el diagrama de radiación en tres dimensiones para pasarlo a dos dimensiones. Este tipo de diagrama es el más habitual ya que es más fácil de medir y de interpretar.

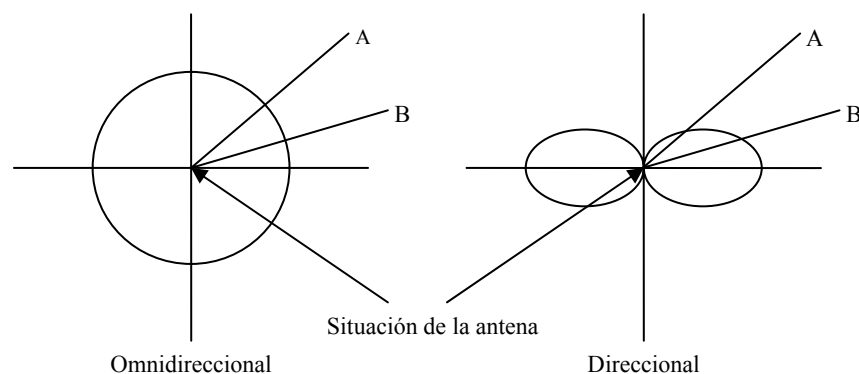


Figura 30 Patrones de radiación: ejemplos ideales

## Antena Isotrópica

Modelo hipotético de antena sin pérdidas que emite una intensidad de radiación uniforme en todas direcciones. Es utilizada como referencia a 0 dB en el cálculo de la ganancia aportada por antenas directivas.

## Ganancia de la antena

La ganancia de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena.

La mayoría de fabricantes especifica la ganancia en dBi lo que representa la ganancia comparada con una antena isotrópica.

## Beam width (anchura de haz)

Se utiliza para definir la directividad de una antena direccional. El ancho del haz de la antena es sólo la separación angular entre los dos puntos de media potencia (-3dB) en el lóbulo principal del patrón de radiación del plano de la antena, por lo general tomando uno de los planos "principales".

El ancho del haz para una antena cuyo patrón de radiación se muestra en la *Figura 31* es el ángulo formado entre los puntos A, X y B (ángulo  $\Phi$ ). Los puntos A y B son los puntos de media potencia (la densidad de potencia en estos puntos es la mitad de la densidad de potencia, a una distancia igual de la antena, en la dirección de la máxima radiación). El ancho de haz de la antena se llama ancho de haz de -3dB o ancho de haz de media potencia.

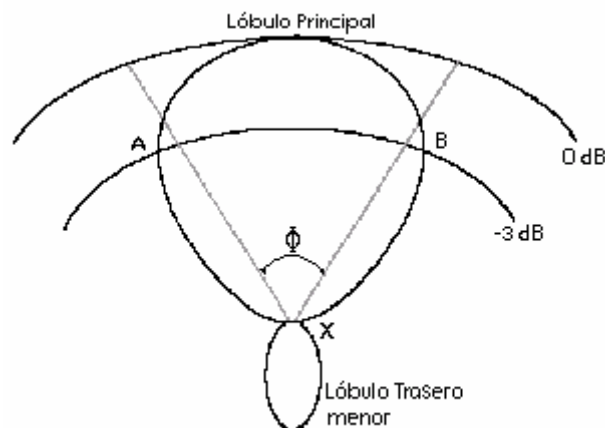


Figura 31 Anchura de haz

## Polarización de la Antena

La polarización de una antena se refiere sólo a la orientación del campo eléctrico radiado desde ésta. Una antena puede polarizarse en forma lineal (por lo

general, polarizada horizontal o vertical), en forma elíptica o circular. Si una antena irradia una onda electromagnética polarizada verticalmente, la antena se define como polarizada verticalmente; si la antena irradia una onda electromagnética polarizada horizontalmente, se dice que la antena está polarizada horizontalmente; si el campo eléctrico radiado gira en un patrón elíptico, está polarizada elípticamente; y si el campo eléctrico gira en un patrón circular, está polarizada circularmente.

### Resistencia de radiación

Debido a la radiación, en las antenas se presenta pérdida de potencia; por ello se ha establecido un parámetro denominado resistencia de radiación  $R_r$ , cuyo valor podemos definir como el valor de una resistencia típica en la cual, al circular la misma corriente que circula en la antena, disiparía la misma cantidad de potencia.

#### 2.3.1.2 Tipos de Antenas

Existen diferentes tipos de antenas para la banda de 2.4 GHz, cada una de las cuales tiene una aplicación y entorno de uso específico, ofreciendo una capacidad de cobertura determinada. Normalmente, a medida que la ganancia de una antena se incrementa se alcanzan distancias de cobertura mucho mayores, pero sólo en una dirección determinada. Los patrones de radiación son los que definen la directividad de una antena determinada.

#### Antenas Omnidireccionales

Una antena omnidireccional es aquella diseñada para proveer un patrón de radiación de  $360^\circ$  (Figura 32). Propagan la señal de RF en todas las direcciones en el plano horizontal aunque tienen un rango limitado en el plano vertical. Son las más comunes en WLAN y se utilizan cuando se requiere dotar de cobertura en todas las direcciones. Sus ganancias pueden llegar hasta 6 dB. Proporcionan la cobertura más amplia dentro de edificios, pudiendo formar celdas circulares mínimamente solapadas a lo largo del edificio. La mayoría de los puntos de acceso estándar disponen de una antena omnidireccional de baja ganancia.

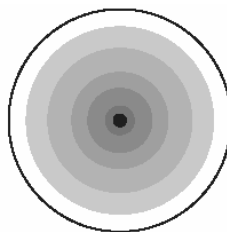


Figura 32 Radiación de una antena omnidireccional

#### Antenas Direccionales

Las antenas direccionales transmiten y reciben energía RF más en una determinada dirección que en otras. Este patrón de radiación es similar a la luz producida por un flash o un foco. La antena no añade potencia a la señal sino que simplemente redirige la energía entregada por el transmisor en una determinada

dirección. Al distribuir más energía en una dirección y menos en el resto la ganancia de las antenas direccionales se incrementa y su ángulo de radiación generalmente decrece, proporcionando una mayor distancia de cobertura pero reduciéndose el ángulo de cobertura. Existen diferentes tipos de antena direccionales, cada una con una forma y estilo determinado, incluyendo *yagis*, antenas *patch* y *parabólicas*.

Las antenas deben de dotar a la onda radiada con un aspecto de dirección. Es decir, deben acentuar un sólo aspecto de dirección, y anular o mermar los demás. Esto es necesario ya que sólo nos interesa radiar hacia una dirección determinada (*Figura 33*).

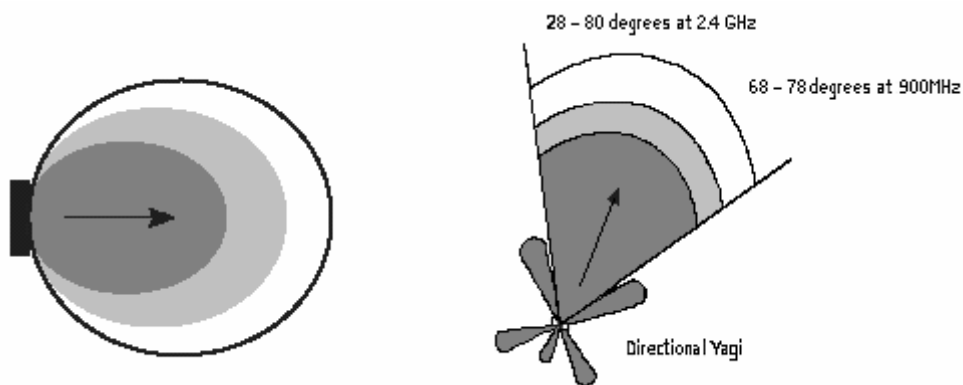


Figura 33 Radiación de antenas direccionales

## Sistemas de diversidad

Los sistemas de diversidad se utilizan para reducir la distorsión conocida como pérdidas por multitrayecto debido a reflexiones. Utiliza dos antenas idénticas separadas por muy poca distancia y que proporcionan cobertura a una misma área. El sistema funciona como un conmutador que selecciona una u otra antena, nunca las dos al mismo tiempo.

El receptor estará continuamente conmutando entre las escuchas de ambas antenas por paquetes validos. Después de que llega un paquete valido, el receptor evaluará el final de la señal de sincronismo del paquete de una antena y después conmuta a la otra antena y evalúa igualmente. Después se selecciona la mejor y se usará sólo esa antena para lo que queda de paquete.

### 2.3.2 Interferencias y ruido

#### Interferencias

Las interferencias de radio frecuencia son uno de los asuntos más importantes a tener en cuenta para el éxito en el diseño, operación y mantenimiento de sistemas inalámbricos.

La principal causa de interferencia en cualquier señal de radio son los materiales del entorno, especialmente aquellos de tipo metálico con tendencia a

reflejar las señales. Las fuentes potenciales de interferencia de este tipo son numerosas: materiales metálicos, aislamientos, pinturas de plomo,... y pueden reducir la calidad de la señal WLAN.

Los materiales con alta densidad como el hormigón, tienden a ser más duros de penetrar para las señales de radio, absorbiendo más energía que muchos materiales porosos como madera o yeso.

Existen otros dispositivos que utilizan la misma frecuencia que también pueden ser fuente de interferencias como hornos microondas y ciertos teléfonos inalámbricos.

Las interferencias de intermodulación e ínter símbolo también constituyen problemas a tener en cuenta a la hora de planificar un sistema inalámbrico.

### **Distorsión por intermodulación**

Distorsión no lineal en un sistema caracterizada por la aparición en la salida de frecuencias que son combinaciones lineales de las frecuencias fundamentales y sus armónicos presentes en la señal de entrada.

### **Interferencia inter-símbolo (ISI)**

La presencia de trayectos múltiples en propagación de radio es un fenómeno que se debe a las reflexiones (ecos) de las ondas sobre el suelo o los obstáculos presentes en el trayecto que une el emisor al receptor.

En transmisión digital, este fenómeno es la causa de desvanecimientos de la señal recibida, produciendo una fuerte degradación de la tasa de error; este es el fenómeno de interferencia ínter símbolo.

### **Ruido**

Se entiende por ruido a la señal no deseada presente siempre en un sistema eléctrico. El ruido reduce la capacidad del receptor para reconocer correctamente los símbolos, lo que limita la velocidad de transmisión. El ruido se incrementa por una gran variedad de causas, naturales o artificiales.

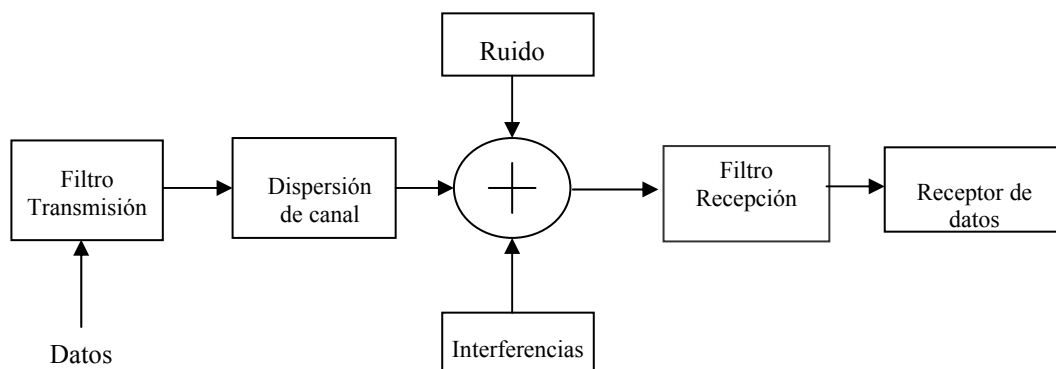


Figura 34 Factores que intervienen en una comunicación

## 2.4 Cobertura WLAN INDOOR

Para llevar a cabo un modelo de cobertura WLAN así como para realizar una correcta planificación de su estructura, es imprescindible conocer previamente qué factores pueden intervenir en el proceso completo de intercambio de señales entre emisor y receptor.

En general los canales de propagación en interiores (indoor channels) pueden clasificarse en:

- Canales de propagación en Línea de Visión (LOS)
- Canales de propagación en Línea con Obstáculos (OBS)

### 2.4.1 Límites de Emisión en WLAN

Entre otros factores, la limitación de potencia impuesta por las distintas autoridades influye evidentemente en la cobertura inalámbrica.

La tabla siguiente muestra los niveles de potencia permitidos en cada una de las regiones para la banda de 2.4 GHz.

Máxima potencia de salida	Localización Geográfica	Documento de Complacencia
1000 mW	EE.UU.	FCC 15.247
100 mW (EIRP)	EUROPA	ETS 300-328
10 mW/MHz	JAPÓN	MPT ordinance 79

Tabla 2 Niveles de potencia de transmisión para diferentes regiones

En los Estados Unidos la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) regula el uso de antenas a través de su norma FCC Part 15.247, el cual define los límites de potencia de emisión para redes inalámbricas.

En Europa es el “European Telecommunications Standards Institute” que en su documento ETS 300-328 [ETS96] el que regula los límites de potencia de emisión.

El concepto básico para la comprensión de estas normas es el EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power), que representa la potencia efectiva máxima de transmisión, incluida la ganancia proporcionada por la antena. Para antenas omnidireccionales el FCC fija el valor máximo de EIRP en 1 vatio.

Por ejemplo, si un dispositivo radio emite a una potencia de transmisión de 100 mW con una antena de 3dB su EIRP será de 200mW. Si la ganancia fuese de 6dB el valor se duplicaría el EIRP a 400mW, si fuese 9dB se duplicaría nuevamente a 800mW y así sucesivamente.

Con antenas de alta ganancia la FCC no es tan restrictivo en los límites del EIRP. Si la ganancia es de al menos 6dBi se permite operar con EIRP de hasta 4 vatios (1 vatio más 6dB de ganancia). La razón de esto es que se considera a las antenas de mayor ganancia como más directivas lo cual reduce las posibilidades de interferencias con otros sistemas. No obstante, la FCC exige la reducción de la potencia de transmisión en 1 dB por cada 3 dB de ganancia adicional de la antena por encima de 6 dBi. Esto significa que cuando la ganancia sube, se decremента la potencia pero en menor grado. El resultado es que está permitido valores de EIRP mayores a 4 vatios para antenas de ganancia superior a 6 dBi.

En la banda de 5 MHz. los niveles de potencia se establecieron en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones 2003 [CMR03] y se puede ver en la *Tabla 1*.

### 2.4.2 Umbral mínimo de recepción

El umbral mínimo de recepción de un dispositivo va a estar en función de sus características funcionales. La mayoría de los fabricantes incluyen en las especificaciones técnicas de sus productos los niveles de sensibilidad de recepción para cada una de las velocidades definidas en el 802.11b.

La siguiente tabla indica la sensibilidad de recepción del *Cisco Aironet 1100* según el Manual Técnico del producto editado por Cisco [Cis03b].

Velocidad	Potencia
1 Mbps	-94 dBm
2 Mbps	-91 dBm
5,5 Mbps	-89 dBm
11 Mbps	-85 dBm

Tabla 3 Sensibilidad de recepción de Cisco Aironet 1100

### 2.4.3 Propagación de ondas radioeléctricas indoor

A continuación se describirán fenómenos relevantes para el modelado de la propagación en entornos indoor, que como hemos comentado anteriormente, tiene características especiales.

La *Figura 35* muestra una típica propagación indoor en función de la potencia recibida, y en una distancia dada entre transmisor y receptor en metros.

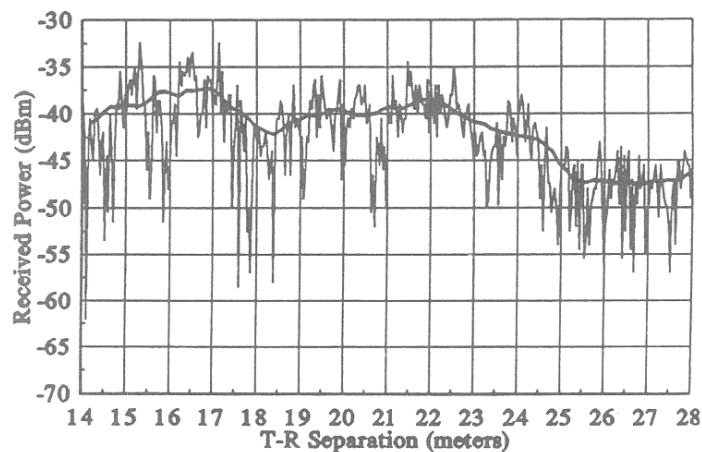


Figura 35. Potencia recibida en función de la distancia transmisor – receptor

La *Figura 35* ilustra cómo la potencia media recibida (línea central) varía ligeramente con la distancia (slow fading), pero existen picos de variación cuando el receptor se mueve. Pequeños cambios en la posición u orientación del receptor respecto al emisor, pueden originar grandes variaciones en la intensidad de señal recibida **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Algunos de los fenómenos que producen este efecto serán descritos más adelante.

En los apartados siguientes se van a ir tratando los distintos elementos que influyen en la transmisión

#### 2.4.3.1 Propagación en espacio libre (LOS)

Se denomina propagación en espacio libre a la propagación cuando no existen obstáculos en el camino entre el transmisor y el receptor. La pérdida de señal que se produce está en función principalmente de la distancia que les separa, interviniendo igualmente otros factores como el tipo y diseño de las antenas, su patrón de radiación, etc.

La transmisión se ve afectada también por posibles reflexiones de la señal que se agregan a la señal directa produciendo variaciones considerables como se verá también en la propagación con línea de obstáculos.

#### 2.4.3.2 Propagación en Línea con Obstáculos (NLOS)

En un entorno cerrado existirán multitud de obstáculos que se interpondrán en el trayecto seguido por las ondas electromagnéticas. Cada uno de estos obstáculos (paredes, suelos, muebles,...) afecta a la señal de determinada forma:

- Los objetos metálicos reflejan las señales de radio. Esto significa que la señal no atravesará muros metálicos y que los objetos metálicos dentro de una habitación reflejarán la señal y causarán desvanecimientos y atenuaciones de la señal.



- Madera, cristal, plástico y ladrillo reflejan parte de la señal de radio y dejan pasar parte del resto.
- Los objetos que contienen un alto grado de humedad absorben la mayor parte de la señal.

Cuando la señal electromagnética se propaga por una estancia es afectada por múltiples fenómenos diferentes debido a los diferentes tipos de obstáculos descritos. Es por tanto imprescindible tener en cuenta estos fenómenos, que causan atenuaciones y desvanecimientos de la señal original, a la hora de diseñar un modelo matemático de cobertura para WLAN **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

#### 2.4.3.2.1 Reflexión

La reflexión ocurre cuando una onda electromagnética que se propaga por el aire incide contra un objeto de grandes dimensiones en comparación con la longitud de onda de la señal **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El resultado puede ser que la señal sea absorbida, reflejada o una combinación de ambas. Esta reacción depende principalmente de:

- Propiedades físicas del obstáculo, como pueden ser su geometría, textura y composición.
- Propiedades de la señal, como el ángulo de incidencia, orientación y longitud de onda.

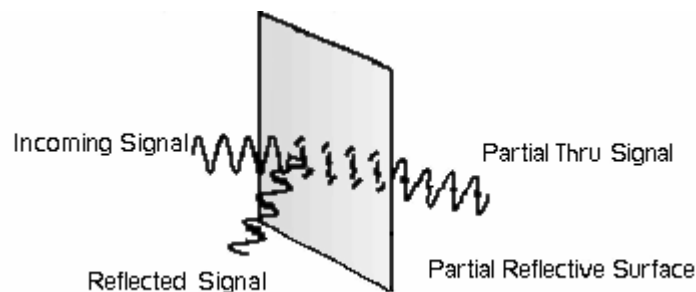


Figura 36 Reflexión de una señal

Los conductores perfectos reflejarán la totalidad de la señal. Otros materiales reflejarán solo una parte de la energía incidente y transmitirán el resto. La cantidad exacta de transmisión y reflexión depende igualmente del ángulo de incidencia así como del grosor y propiedades dieléctricas material.

##### 2.4.3.2.1.1 Desvanecimiento por multitrayecto debido a reflexiones

Cuando una señal electromagnética es transmitida por el aire, es muy probable que debido al fenómeno de reflexión, alcance al receptor por múltiples caminos. Las señales procedentes de caminos alternativos llegarán ligeramente retardadas con respecto a la señal directa, lo que provoca efecto *fading* o desvanecimiento. Esto es debido a que las señales reflejadas tendrán diferente amplitud que la señal directa cuando lleguen al punto de recepción retardadas.

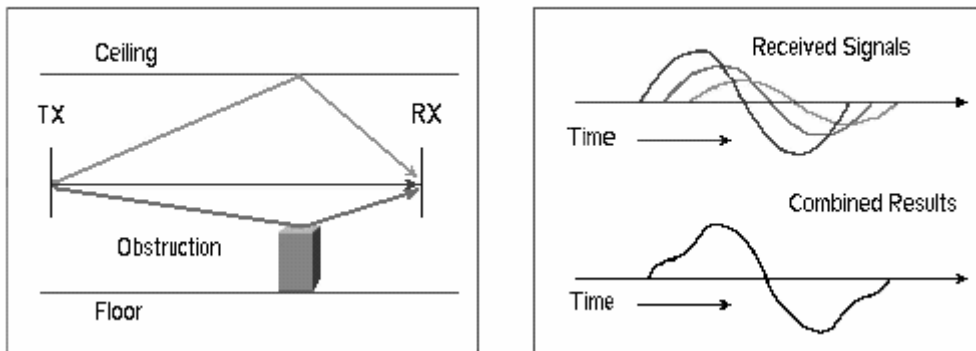


Figura 37 Multitrayecto y sus efectos

El Multitrayecto provoca variaciones aleatorias en la amplitud de la señal recibida sobre un margen de frecuencias. Sus efectos varían dependiendo de la localización de la antena así como del tipo de antena utilizado. Los resultados observados son una variación “in and out” de la señal conocida como fading o desvanecimiento, pudiendo existir variaciones de hasta 40 dB como se puede ver en la *Figura 35* de la página 52.

#### 2.4.3.2.1.2 Perfil de retardo

El perfil de retardo es la previsión de potencia recibida por unidad de tiempo con un cierto nivel de retardo. El MDT (*Maximum Delay Time Spread*) es el intervalo de tiempo total durante el que se reciben señales reflejadas con energía significativa. El RMS (*Root Mean Square Delay Spread*) es la desviación típica del retardo de reflexión, ponderado según la energía de las ondas reflejadas.

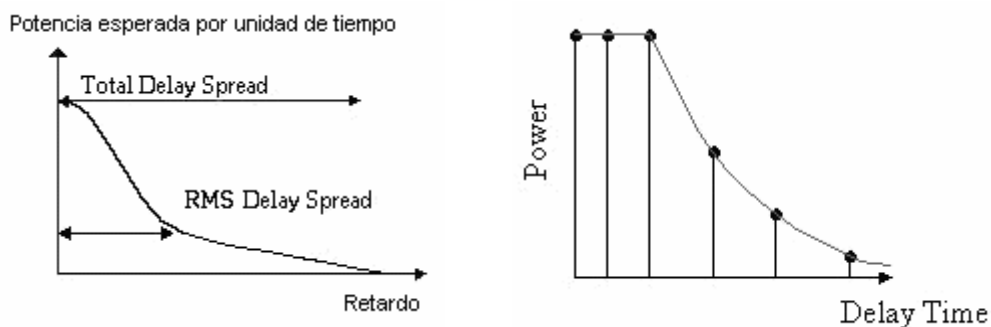


Figura 38. Perfil de retardo típico

El perfil de retardo típico tiene una forma plana en su cabeza hasta un determinado punto cayendo posteriormente con el tiempo a niveles cada vez más débiles. Esto es debido a que las primeras señales reflejadas se reciben con potencia casi idéntica.

#### Consecuencias de la dispersión de retardo

El perfil de retardo provocado por reflexiones produce interferencia inter símbolo, lo que genera una tasa irreducible de BER (Bit Error Rate) en los sistemas

inalámbricos. En retardos pequeños (con relación a la duración del símbolo) predomina el *flat fading* o desvanecimiento plano. En el *flat fading* la potencia de la señal recibida cambia con el tiempo debido a fluctuaciones de ganancia del canal causadas por los multitrayectos, pero el espectro de la señal recibida se mantiene o varía en la misma proporción. Los canales típicos con *flat fading* provocan desvanecimientos profundos y pueden requerir de un incremento de 20 a 30 dB en la potencia de emisión para lograr tasas de BER bajas. Para retardos mayores, los errores de temporización y la interferencia inter-símbolo son los predominantes.

### Relación entre la dispersión de retardo RMS y la Tasa de Error

La siguiente figura muestra la conexión directa entre la tasa de error de símbolo y el RMS. La curva más baja corresponde a la modulación CCK utilizada en 802.11b para transmisiones a 5.5Mbps y 11Mbps.

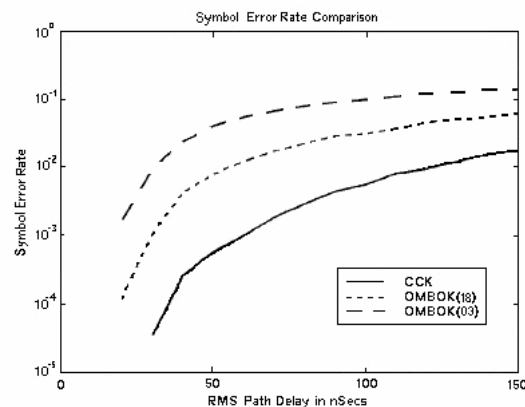


Figura 39 Comparativa de BER

### Relación entre la distancia transmisor-receptor y la dispersión de retardo

La dispersión de retardo se incrementa normalmente con la distancia entre transmisor y receptor, así como en función de las características del entorno. La siguiente figura muestra las medidas realizadas en el Cory Hall en la UC Berkeley.

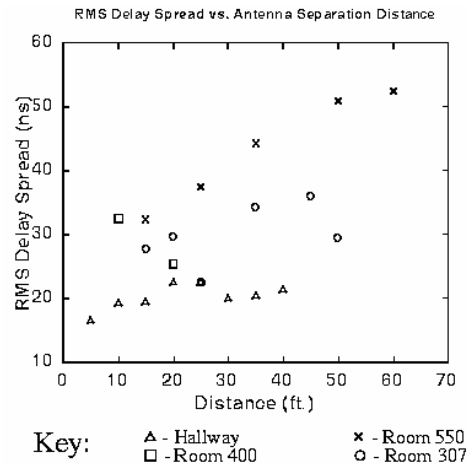


Figura 40. Dispersión de retardo RMS vs. Distancia

El estudio demostró que la dispersión de retardo se incrementa con la distancia entre transmisor y receptor y las dimensiones de la estancia. En habitaciones de pequeñas dimensiones y pocos obstáculos la dispersión de retardo apenas se incrementa con la distancia (ver medición en *hallway*).

### Receptor Rake

Una de las razones más importantes para usar el espectro extendido es su habilidad para discriminar las interferencias producidas por multitrayectos. Una implementación de receptor RAKE para secuencia directa (DSSS) permite que los diferentes componentes de una señal individual producidos por retardos de multitrayecto sean detectados por separado y coherentemente combinados. Esto no sólo tiende a prevenir pérdidas graduales, si no que también proporciona un efecto de diversidad de canales resultando unos enlaces muy robustos.

El nombre proviene de que el efecto obtenido es comparable al de un rastrillo recogiendo hojas, de modo que cuantas más señales se captan mejor será el resultado final.

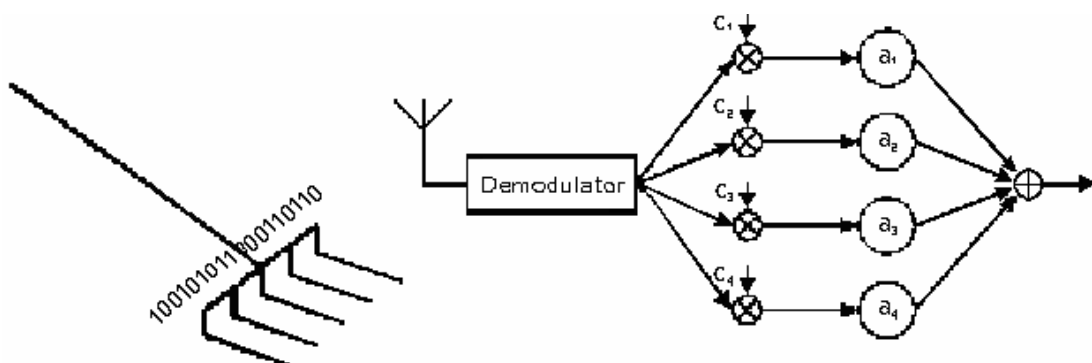


Figura 41 Estructura de un receptor RAKE

En la *Figura 42* podemos ver el proceso. Cuando la señal se recibe puede llegar con cambios de fase o retardos de tiempo. Esto se soluciona al alinear la trama

y en la etapa de muestreo; posteriormente se desengancha cada señal y los datos son combinados para tener un enlace más robusto.

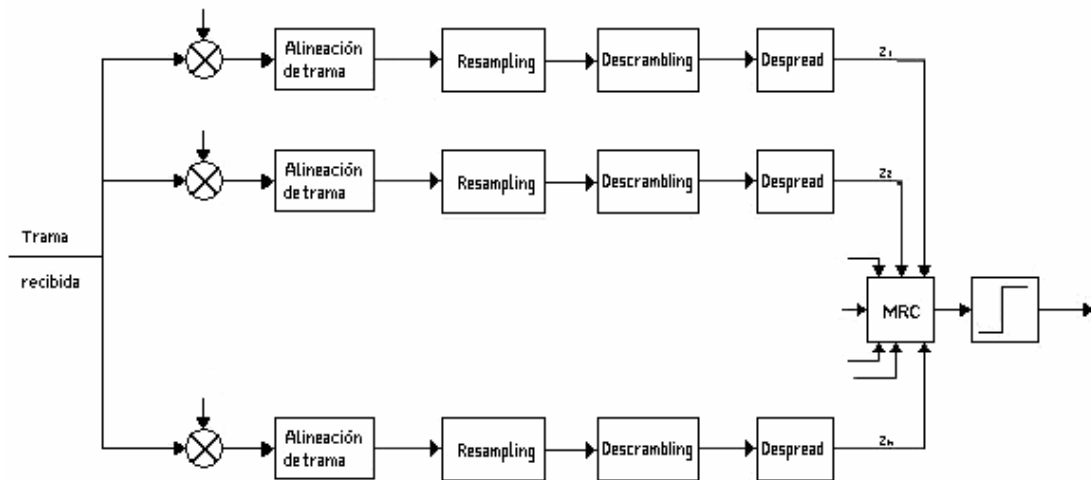


Figura 42 Procedimiento de los canales en el receptor RAKE

Por tanto, un receptor RAKE estará compuesto por un conjunto de elementos que ponen en correlación una determinada componente multitrayecto de la señal deseada. La salida de cada uno de estos elementos denominados *correlator* puede ser ponderada de acuerdo con su potencia relativa y la suma de todas las salidas obtiene la estimación final. Los receptores RAKE pueden utilizarse para mejorar el rendimiento allí donde ocurren el desvanecimiento selectivo de frecuencia y el desvanecimiento por multitrayecto.

#### 2.4.3.2 Penetración

La penetración o transmisión se produce cuando la señal se encuentra en su camino con un obstáculo que es, por así decirlo, transparente para las ondas de radio. Cuando la señal penetra un obstáculo experimentará una pérdida, la cual será función del grosor del objeto y del material del que está compuesto. La frecuencia de la onda electromagnética también influye en qué proporción de la señal incidente atraviesa el objeto. Existen multitud de estudios sobre pérdidas estimadas en diferentes materiales en WLAN. La siguiente tabla es un extracto del documento publicado por Ericsson “Wireless LAN User’s Guide version 4.2” y en ella se presentan las pérdidas predecibles en la penetración de diferentes tipos de materiales.

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

Tabla 4 Penetración a través de diferentes tipos de materiales

### 2.4.3.2.3 Difracción

En óptica se entiende por difracción la desviación del rayo luminoso al rozar el borde de un cuerpo opaco. Las ondas difractadas se forman cuando el camino de propagación de la onda de radio es obstruido por una superficie que tiene irregularidades o bordes puntiagudos o angulados. La difracción ocurre cuando los obstáculos son impenetrables por las ondas de radio. Basándose en el principio de Huygen, el resultado son ondas secundarias alrededor y detrás del obstáculo, incluso en zonas sin visibilidad directa entre transmisor y receptor (*Figura 43*).

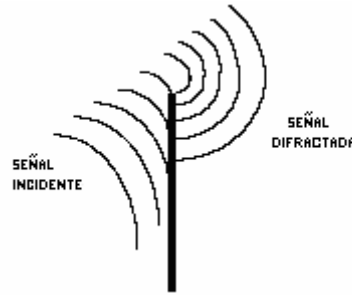


Figura 43 Difracción de señal

Los escenarios cerrados contienen muchos tipos de objetos con estas características orientados tanto en el plano vertical como horizontal. La señal difractada depende de la geometría del objeto así como la amplitud, fase y polarización de la onda incidente en el punto de difracción.

### Zonas de Fresnel

Las Zonas de Fresnel explican el concepto de pérdidas por difracción como función de la distancia del trayecto de borde del objeto. Las zonas de Fresnel representan regiones sucesivas donde las ondas secundarias tienen una longitud de trayecto desde el transmisor al receptor ( $n \cdot \lambda/2$ ) más grande que la longitud total del camino directo. La *Figura 44* representa las zonas de Fresnel como círculos concéntricos sobre un plano. Las sucesivas zonas de Fresnel tienen el efecto de provocar alternativamente efectos constructivos y destructivos sobre el total de la señal recibida.

El radio del círculo n-ésimo de una zona de Fresnel se define por  $r_n$ .

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad \text{cuando } d_1, d_2 \gg r_n$$

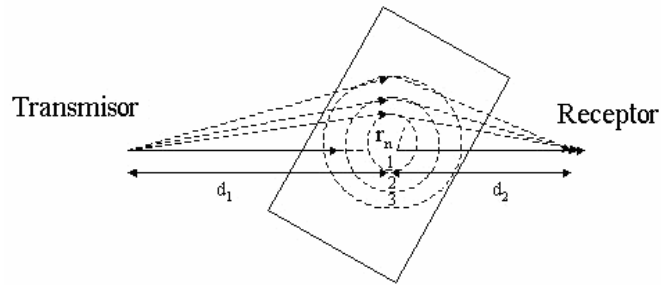


Figura 44 Círculos concéntricos que definen los límites de las Zonas de Fresnel

El incremento total de la longitud del trayecto a través del círculo  $n$ -ésimo es  $n\lambda/2$  donde  $n$  es un entero que representa el número de círculo. La *Figura 45* muestra un obstáculo bloqueando el trayecto directo, una serie de elipses pueden ser trazadas entre transmisor y receptor uniendo todos los puntos en los cuales el exceso de retardo de propagación es un número entero múltiplo de la mitad de la longitud de onda. Las elipses representan las Zonas de Fresnel.

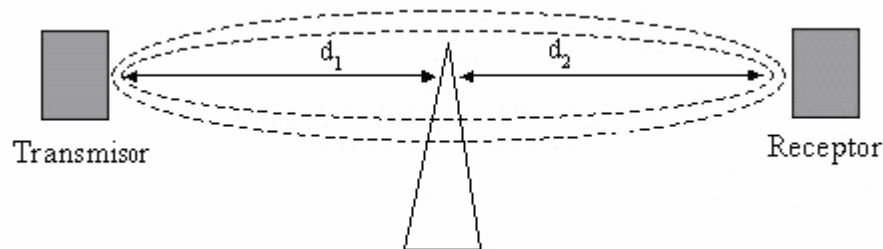


Figura 45 Zonas de Fresnel representadas como elipses

En sistemas inalámbricos las pérdidas por difracción ocurren por la obstrucción de ondas secundarias de modo que solo una porción de la señal es difraccionada alrededor de un obstáculo. En enlaces de microondas con visión directa se considera que si al menos el 55% de la primera Zona de Fresnel está 'limpia', la claridad del resto de Zonas de Fresnel no altera significativamente la pérdida de difracción.

### Modelos de difracción de objetos puntiagudos

Generalmente es imposible realizar estimaciones precisas de las pérdidas por difracción y la predicción es un proceso de aproximación teórica modificado por las necesarias correcciones empíricas. Cuando se observa la pérdida de una superficie afilada de manera aislada se obtiene un buen punto de vista del significado de la pérdida por difracción. Para estimar esta pérdida se usa el parámetro de difracción expresado matemáticamente como:

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

Donde los parámetros son ilustrados en la siguiente figura:

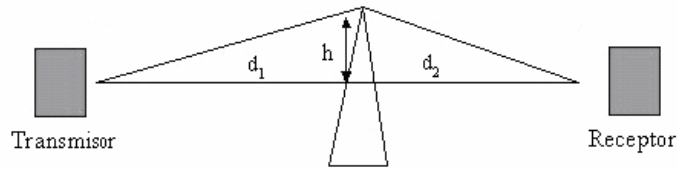


Figura 46 Difracción de objetos puntiagudos

#### 2.4.3.2.4 Dispersión

La dispersión ocurre cuando en el camino la señal se encuentra con objetos cuyas dimensiones son pequeñas con relación a la longitud de onda. El resultado es que el frente de onda se rompe o dispersa en múltiples direcciones (*Figura 47*).

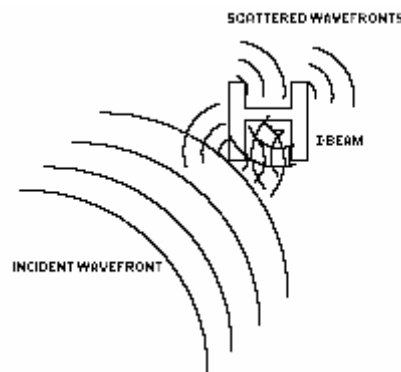


Figura 47 Dispersión de señal

Las ondas dispersas son producidas por superficies desiguales, pequeños objetos y otras irregularidades presentes en el canal. La mayoría de las construcciones modernas contienen vigas de hierro forjado en su estructura además de conductos para los servicios eléctricos y de tuberías. En la práctica, el follaje, señales de tráfico o farolas pueden provocar dispersión en sistemas de comunicaciones inalámbricos.



# CAPÍTULO 3

## TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

---

Un modelo es una representación simplificada de la realidad, por medio de un conjunto de restricciones e hipótesis.

Un modelo científico se puede definir como una explicación de determinados fenómenos naturales representada de una forma determinada. Por ejemplo, Galileo desarrolló un modelo para explicar los patrones de movimiento de los objetos celestes, incluidas las salidas y puestas del sol y de la luna. Los actuales científicos desarrollan modelos para explicar el fenómeno de división incontrolada de células o ausencia de “apoptosis” (muerte programada de células) asociada con el cáncer. Y como veremos más adelante, se desarrollan modelos para explicar el fenómeno de propagación de ondas de radiofrecuencia en redes inalámbricas.

Los científicos usan dibujos, gráficos, ecuaciones, estructuras tridimensionales, o explicaciones en texto libre para comunicar sus modelos (que son ideas, no objetos físicos) a otros científicos.

### 3.1 Tipos de modelos

#### 3.1.1 Modelos matemáticos

Son procedimientos matemáticos que describen el comportamiento del fenómeno modelado. Dependiendo de la complejidad de las fórmulas matemáticas aplicadas y del número de parámetros de las que dependan, pueden llegar a necesitar gran cantidad de potencia de computación para generar los resultados.

#### 3.1.2 Modelos Empíricos o estadísticos

Se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas del fenómeno realizadas sobre el terreno.

La principal ventaja de este tipo de modelos es que se tienen en cuenta de forma implícita las influencias propias del entorno en su conjunto, sin ser reconocidas cada una de ellas de manera aislada.

Por el contrario, su precisión depende no sólo de la precisión de las medidas, si no de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analizar [NNP00a].

### **3.1.3 Modelos Teóricos**

Se basan en los principios fundamentales del medio que se intenta modelar (por ejemplo los principios de la física, si se modelan fenómenos físicos). Pueden ser aplicados en diferentes entornos sin que se vea afectada su precisión.

En la práctica la implementación de modelos teóricos requiere enormes bases de datos de características relativas al entorno, las cuales en la práctica son imposibles de obtener en muchos casos, o muy difíciles de obtener.

Los algoritmos usados por los modelos teóricos son generalmente muy complejos y computacionalmente poco eficientes. Por esta razón su implementación se restringe a pequeñas áreas. Por el contrario, si su implementación es correcta, proporcionan gran precisión en su predicción, en comparación con los modelos empíricos.

### **3.1.4 Modelos deterministas**

En este tipo de modelos los resultados de la simulación no tienen ninguna distribución de probabilidad, y son valores que sólo dependen de las condiciones de simulación (entradas). Siempre con la misma entrada van a producir la misma salida.

### **3.1.5 Modelos estocásticos**

Son modelos en los que los resultados del modelo tienen una distribución de probabilidad. La misma entrada no tiene porqué producir los mismos resultados, en distintas simulaciones del modelo.

### **3.1.6 Modelos de caja negra**

Son modelos en los que sólo se reproduce la entrada y salida del fenómeno, sin preocuparse de lo que pase en el interior.

## **3.2 Validez de un modelo**

Queda claro que existen muchos tipos de modelos (al menos ateniéndonos a los tipos de modelos), lo que puede dar lugar a que para un único fenómeno se puedan plantear diferentes modelos, y para definir si un modelo es correcto se pueden usar varios factores:

1. El modelo puede *explicar* las observaciones realizadas del fenómeno.
2. Se puede usar el modelo para *predecir* el comportamiento de fenómeno modelado.
3. El modelo es *consistente con otras ideas* acerca del funcionamiento del fenómeno modelado

En primer lugar, de un modelo no se dice si es correcto, si no que se dice que es “*aceptable*”. Y la aceptabilidad del modelo se basa en la capacidad del modelo de cumplir los tres factores expuestos anteriormente: explicar, predecir y ser consistente con otros conocimientos.

En segundo lugar, puede haber más de un modelo que sea una explicación “*aceptable*” para el mismo fenómeno. No siempre es posible (ni deseable) elegir un único modelo como aceptable.

Los modelos tampoco son inamovibles. Es frecuente que con el aumento de observaciones del fenómeno se cambien los modelos, aparezcan otros más “*aceptables*”, que son capaces de explicar más casos de comportamiento; que pueden predecir mejor el comportamiento o que son más consistentes con otros tipos de conocimiento.

En resumen:

- Los modelos son representaciones simplificadas de la realidad por medio de un conjunto de restricciones e hipótesis.
- Los modelos son ideas que usan los científicos para explicar patrones de comportamiento que se observan en el mundo real.
- Los modelos se consideran aceptables o no aceptables en base a lo bien que pueden explicar y predecir comportamientos; y si son consistentes con otros conocimientos contrastados.
- Los modelos se usan constantemente para responder cuestiones acerca de determinados fenómenos, y cuando se obtienen nuevos datos son susceptibles de ser revisados o descartados.



# CAPÍTULO 4

## MODELOS DE PROPAGACIÓN EN REDES INALÁMBRICAS

---

En este capítulo se pretende dar una visión general sobre las distintas formas de modelar los procesos que ocurren en la propagación de señales de radiofrecuencia; en particular, en un entorno interior a un edificio (INDOOR).

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos utilizados para representar las características de radio de un determinado entorno [NNP00a].

La señal emitida por una antena (emisor) va a experimentar múltiples transformaciones en su señal y camino a lo largo de su trayectoria por el medio de propagación, llegando al receptor solo una pequeña parte. El camino entre receptor y emisor pueden variar en múltiples formas debido a la existencia de diferentes obstáculos. Esto hace muy difícil predecir la señal recibida en un determinado punto o analizar el canal de radio.

Los modelos de propagación se han enfocado tradicionalmente en predecir la potencia promedio de la señal recibida; así como la variación de la potencia en la proximidad espacial de un lugar en particular.

Los modelos de propagación de radio se pueden clasificar en dos tipos principales: modelos outdoor y modelos indoor. Además, ateniéndonos al tamaño de la zona de cobertura, los modelos outdoor se pueden dividir en modelos de propagación en zonas grandes (macrocelas) y de zonas pequeñas (microcelas).

Existen más modelos de propagación para sistema inalámbricos outdoor, debido a que la comunicación inalámbrica outdoor se viene utilizando desde hace mucho más tiempo: radio, televisión,... Los modelos outdoor no tienen en cuenta las características particulares de la propagación indoor.

El campo de la propagación indoor es relativamente nuevo y las primeras investigaciones datan de primeros de los 1980s. La llegada de las WLAN hace todavía más necesario el disponer de modelos indoor de predicción de cobertura.

La mayoría de los modelos de cobertura de redes inalámbricas existentes son modelos de caja negra, en los que se ajustan los parámetros del modelo y se aplican las fórmulas directamente para obtener los resultados de cobertura.

## 4.1 Modelos OUTDOOR

En el campo OUTDOOR existen muchos más modelos, debido principalmente a que se utilizan desde hace mucho tiempo.

Dentro de los modelos OUTDOOR se puede hacer una clasificación atendiendo al tamaño del área de cobertura. Así los modelos que cubren áreas del orden de varias decenas de Km, con emisiones de potencia de varias decenas de vatios, desde antenas bastante elevadas se clasifican como macroceldas (macrocell).

Los modelos que cubren áreas del orden de 200 a 1000 metros, con emisiones de potencia del orden de 10 mW a 1W y antenas de entre 3 a 10 metros se clasifican como microceldas (microcell). Por ejemplo una calle con la antena en un tejado de los edificios de alrededor.

Existen multitud de modelos para macroceldas, entre otros: el modelo de Bullington [Bul77], el modelo de Okumura *et al.*[Oku+68], el modelo ITU (CCIR) [CIR90], el modelo Hata, el modelo Ericsson 9999 [Eri97], el modelo Lee **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el modelo COST 231-Walfisch-Ikegami [Cos96], el modelo ETF-ANN [PRB96],[NNP98], y muchos más.

También hay bastantes modelos para microceldas como el modelo Two-Ray **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, modelos basados en UTD (Uniform Theory of Diffraction) y teoría de imágenes múltiples **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el modelo Lee para microceldas **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

## 4.2 Algunos modelos de propagación INDOOR

Los resultados de la predicción de cobertura de un AP proporcionada por un modelo son muy importantes para facilitar las siguientes tareas:

- Predecir el tamaño de las áreas que se pueden cubrir con un único AP.
- Planificar la ubicación de las celdas de modo que, aún utilizando la misma frecuencia, no se interfieran ni causen errores.

En entornos cerrados los niveles de señal fluctúan en mayor medida que en entornos abiertos. Esta diferencia se explica en el hecho de que en una localización específica, el campo eléctrico se forma por un número mucho mayor de componentes indirectos que en el caso de un entorno abierto. Los modelos de propagación indoor difieren de los modelos de propagación tradicionales en dos aspectos:

- Las distancias cubiertas son mucho más pequeñas.

- El componente variable del entorno es mucho mayor para separaciones más pequeñas entre transmisor y receptor.

#### 4.2.1 Modelos Empíricos de propagación de ondas electromagnéticas

Los modelos empíricos se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas realizadas sobre el terreno. Las influencias propias del entorno son tenidas en cuenta de manera implícita en su conjunto, sin ser reconocidas cada una de ellas de manera aislada., siendo ésta la principal ventaja de estos modelos. Por el contrario, su precisión depende no solo de la precisión de las medidas sino de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analizar.

La eficiencia de estos modelos suele ser satisfactoria computacionalmente.

##### 4.2.1.1 Modelo de Propagación en el Espacio Libre

En espacio libre, la energía radiada por una antena omnidireccional se propaga por la superficie de una esfera (*Figura 48*). El área de la superficie de una esfera de radio  $d$  es  $(4\pi)^2 d^2$ .

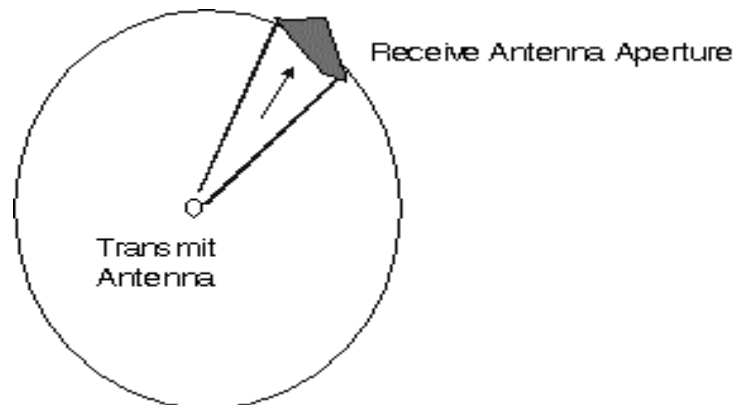


Figura 48 Apertura recibida en una antena

El Modelo de Propagación en Espacio Libre se utiliza para predecir la potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor existe una clara línea de vista. Los sistemas de comunicación por satélite y los enlaces microondas se pueden modelar como propagación en el espacio libre.

Como la mayoría de los modelos de propagación a gran escala, el modelo del espacio libre predice que la potencia recibida decae como función de la distancia de separación entre el transmisor y receptor elevada a alguna potencia. La potencia recibida en el espacio libre por una antena receptora, la cual está separada de la antena transmisora una distancia  $d$ , está dada por la ecuación de Friis:

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

Ecuación 1 Ecuación de Friis

Donde:

$P_r(d)$  – potencia recibida; la cual es función de la separación T-R (transmisor-receptor)

$P_t$  – potencia transmitida

$G_t$  – ganancia de antena transmisora

$G_r$  – ganancia de la antena receptora

$\lambda$  – longitud de onda en metros

$d$  – la distancia de separación de T-R en metros

$L$  – pérdidas del sistema no achacables a la propagación

La ganancia de la antena está dada por:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

La apertura efectiva  $A_e$  se relaciona con el tamaño físico de la antena y con la frecuencia de la portadora mediante:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c}$$

Donde  $f$  es la frecuencia de la portadora en Hz,  $\omega_c$  es la frecuencia de la portadora dada en radianes por segundo y  $c$  es la velocidad de la luz en metros/segundo.

Los valores de  $P_t$  y  $P_r$  deben ser expresados en las mismas unidades, y  $G_t$  y  $G_r$  son cantidades adimensionales. Las pérdidas  $L$  son usualmente debidas a la atenuación de la línea de transmisión, a las pérdidas por filtros, y a las pérdidas de la antena en los sistemas de comunicación. Cuando  $L=1$  significa que no hay pérdidas en el sistema.

Las pérdidas por trayectoria representan la atenuación de la señal como una cantidad positiva medida en dB, y se definen como la diferencia entre la potencia radiada efectiva y la potencia recibida. Puede o no incluir el efecto de ganancia de las antenas; cuando se incluyen la ecuación es la siguiente:

$$PL(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = -10 \cdot \log\left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}\right)$$



Cuando la ganancia de las antenas es excluida, se asume que tiene ganancia unitaria y la ecuación se convierte en:

$$PL(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = -10 \cdot \log\left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}\right)$$

La ecuación de Friis muestra que la potencia de la señal recibida se atenúa de acuerdo al cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor, lo que implica que decae 20 dB/década.

Cuando se conoce la potencia recibida en una distancia de referencia  $d_0$ , la ecuación siguiente puede utilizarse para calcular la potencia recibida en una distancia más lejana:

$$P_r(d) = P_r(d_0) + 20 \log(d_0/d)$$

La misma ecuación expresada como pérdida de trayecto sería:

$$PL(d) = PL(d_0) + 20 \log(d/d_0) \quad (PL_{FS})$$

La **ecuación de Friis** sólo es válida para predecir  $P_r$  para valores de  $d$  que estén en la región conocida como *far-field* de la antena transmisora. La región *far-field* o región de *Fraunhofer* de una antena transmisora se define como la distancia más allá de la distancia  $d_f$ , la cual se relaciona con la dimensión mayor de la apertura numérica de la antena transmisora y con la longitud de onda de la portadora. La distancia de Fraunhofer está dada por:

$$d_f = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$$

Donde  $D$  es la dimensión física mayor de la antena. Adicionalmente para estar en la región *far-field* se debe satisfacer  $d_f \gg D$  y  $d_f \gg \lambda$ . Además queda claro que la ecuación no es válida para  $d=0$ .

#### 4.2.1.2 Log-Normal Shadowing Path Loss Model

La mayor parte de los modelos empíricos se basan en el siguiente modelo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** según el cual, las pérdidas en entornos cerrados se pueden expresar según una ecuación en función de la distancia entre transmisor y receptor como:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log(d/d_0) + X_\sigma$$

Ecuación 2 Log-Normal Shadowing Path Loss Model

Donde:

$n$  - variable de pérdida de trayecto

$PL(d_0)$  - pérdida a distancia cercana de referencia

$X_\sigma$  - desviación típica

$n$  es una variable de pérdida de trayecto que depende del tipo de entorno. La *Tabla 5* muestra los valores típicos de  $n$  para diferentes entornos.  $X_\sigma$  es una variable aleatoria expresada en dB que indica una desviación típica de  $\sigma$  dB.  $PL(d_0)$  se calcula utilizando el modelo de propagación en espacios abiertos (*Ecuación 1*) o realizando medidas de campo.

Entorno	N
Edificios (condiciones de visión directa)	1.6 a 2
Edificios (sin visión directa)	2 a 4
Edificios (sin visión directa, separación de uno a tres pisos)	4 a 6

Tabla 5 Variable de pérdida de trayecto

La *Figura 49* muestra las curvas de pérdida de trayecto para diferentes valores de la variable de pérdida de trayecto ( $n$ ).

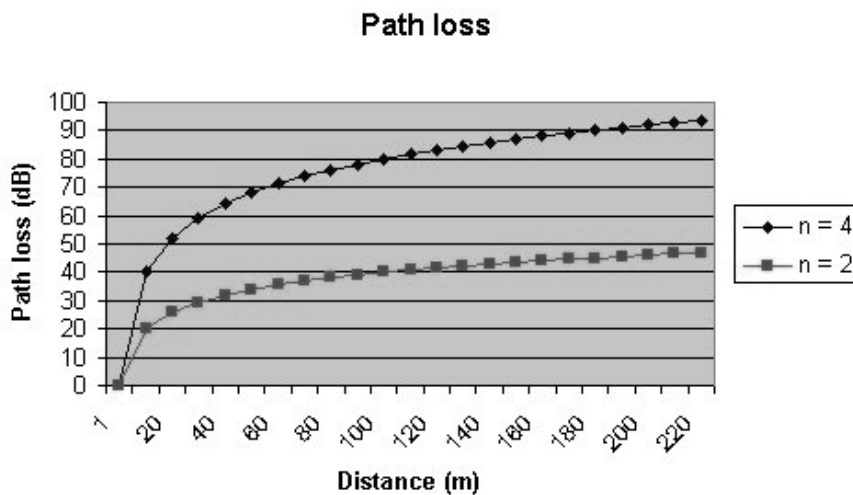


Figura 49 Pérdidas de trayecto para diferentes valores de  $n$

Este modelo es una técnica de estimación de pérdidas de propagación muy práctica y que tiene como principal ventaja que tiene en cuenta todos los factores que influyen en la propagación.

#### 4.2.1.3 Modelo de Pérdida de Trayecto basado en COST 231

Este es el modelo de propagación indoor utilizado en UMTS. Se ha recogido del ETSI TR-101-112 ch. B.1.8 [ETSI], la cual es una especificación de los procedimientos seleccionados para la elección de las tecnologías de transmisión de radio para UMTS.

##### Descripción del modelo

El modelo se basa en el modelo COST 231 [Cos96] definido como:

$$L = L_{FS} + L_c + \sum k_{wi} L_{wi} + n^{((n+2)/(n+1) - b)} * L_f$$

Ecuación 3 Modelo de pérdida de trayecto INDOOR basado en COST · 231

Donde

$L_{FS}$  = pérdida en espacio libre entre transmisor y receptor

$L_c$  = constante de pérdida

$k_{wi}$  = número de paredes de tipo i penetradas

n = número de suelos penetrados

$L_{wi}$  = pérdida debida a muro de tipo i

$L_f$  = pérdida entre suelos adyacentes

b = parámetro empírico

NOTA:  $L_c$  se fija normalmente en 37 dB.

Tipo de Pérdida	Descripción	Factor (dB)
$L_f$	Suelos (estructura típica) - Baldosas - Revestimiento de hormigón - Espesor típico < 30 cm	18.3
$L_{w1}$	Muros internos finos - Yeso - Muros con muchos huecos (ventanas)	3.4
$L_{w2}$	Muros internos - Hormigón, ladrillos - Mínimo número de huecos	6.9

Tabla 6 Valores medios de los factores de pérdida según categoría

El modelo COST 231 es un modelo empírico que tiene en cuenta las pérdidas de propagación en espacio abierto así como las pérdidas introducidas por las paredes, suelos y techos penetrados en el trayecto directo entre transmisor y receptor.

#### 4.2.1.4 Modelo basado en el número de muros y suelos (simplificado)

Caracteriza la pérdida de trayecto en interior por un exponente fijo de 2 (como en el espacio libre) y unos factores de pérdida relacionados con el número de suelos y muros que atraviesa la línea recta entre emisor y receptor.

$$L = L_1 + 20\log(r) + n_f a_f + n_w a_w$$

Ecuación 4 Modelo basado en número de muros y suelos simplificado

Ecuación 5 Modelo de pérdida de trayecto basado en número de muros y suelos (simplificado)

Donde

r = distancia en metros en línea recta

$L_1$  = pérdida de referencia con r=1 metro

$a_f$  = atenuación por cada suelo que atraviesa

$a_w$  = atenuación por cada muro que atraviesa

$n_f$  = número de suelos que atraviesa

$n_w$  = número de muros que atraviesa

#### 4.2.1.5 Modelo ITU-R

Es similar a los 2 anteriores pero sólo tiene en cuenta explícitamente el número de suelos. Las pérdidas en el mismo piso por atravesar muros, se incluyen implícitamente cambiando el exponente en la pérdida de trayecto [Sau99].

$$L_T = L_1 + 20\text{Log}_{10}(f_c[\text{MHz}]) + 10\text{Log}_{10}(r[\text{m}]) + L_f n_f - 28$$

Ecuación 6 Modelo de pérdida de trayecto ITU-R

#### 4.2.1.6 Linear Path Attenuation Model

Para un transmisor y un receptor que se encuentran en la misma planta, Andelman propuso el “*Linear path attenuation model*” [And04]. El path loss medido en dB se obtiene del path loss en espacio libre [ $PL_{FS}$ ] más un factor que es lineal del rango que experimentalmente se ha obtenido. La fórmula utilizada en este modelo es:

$$PL(d) = PL_{FS} + ad$$

Ecuación 7 Modelo de pérdida de trayecto Linear-Path Attenuation Model

Dónde  $a$  es el coeficiente de atenuación lineal y  $d$  es la distancia entre transmisor y receptor. En el caso de un ambiente de oficinas, el coeficiente  $a$  sería 0.47 dB/m. Este modelo es bastante más simple que el modelo Log-Normal Shadowing Path Loss, y no tiene en consideración efectos de desvanecimiento. Sólo toma en consideración la pérdida en espacio libre. Este modelo es susceptible de ser específico de un sitio, esto es debido a que el valor de  $a$  varía de un entorno a otro y debe ser medido con precisión para poder demostrar los beneficios de este modelo [Cra04].

#### 4.2.1.7 Dual Slope-Model

Este modelo fue desarrollado por Feuerstein y Beyer. Ellos observaron que el *path loss* se comporta de diferentes maneras a distancias cercanas y a distancias largas. Para cuantificar este efecto este modelo trabaja con dos modelos path loss, uno para distancias cortas y otro para largas. El primero tiene un rango corto y tiene su propio índice de decaimiento. El segundo es función del primero. Para diferenciar la utilización de ambos modelos se introduce la distancia de ruptura dBR. Las fórmulas utilizadas son las siguientes:

$$PL_{DS1}(d) = 10n_1 \text{Log}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) - a_0$$

$$PL_{DS2}(d) = PL_{DS1}(d_{BR}) + 10n_2 \text{Log}\left(\frac{d}{d_{BR}}\right)$$

Ecuación 8 Modelo de pérdida de trayecto Dual-Slope

$d_{BR}$ : distancia de ruptura.

$\lambda$ : longitud de onda.

$n_1$ : exponente de *path loss* antes de  $d_{BR}$  ( $PL_{DS1}$ ).

$n_2$ : exponente de *path loss* después de  $d_{BR}$  ( $PL_{DS2}$ ).

$a_0$ : diferencia entre  $PL_{DS}$  y  $PL_{FS}$  a la distancia de 1 metro.

$a_0$  es causado por efectos en las ondas y varía entre 0 y 5 dB. En las regiones cercanas,  $n_1$  se suele establecer a 2; y para las regiones lejanas  $n_2$  se suele poner un valor de 6 ó mayor. Este modelo se puede hacer más específico para un sitio al poder introducir los valores  $n_1$  y  $n_2$ . Además la distancia de ruptura  $d_{BR}$  juega un papel muy importante y debe ser un valor que se conozca lo mejor posible y que debe ser establecido en base a mediciones [CRAN04].

#### 4.2.1.8 Keenan-Motley Model

Motley propuso un modelo que se basa tanto en la teoría, como en las medidas hechas en la práctica. Este modelo mide el *path loss* mediante la fuerza de la señal recibida y una distancia de referencia. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$PL_{KM}(d) = PL_M + 10n \text{Log}(d) + k_F PL_{FS}$$

Ecuación 9 Modelo de pérdida de trayecto Keenan-Motley

$PL_M$ : es el *path loss* medido a 1 metro.

$PL_{FS}$ : es el *path loss* en espacio libre; incluyendo pérdidas por penetración a través de suelos/techos.

$k_F$ : número de suelos/techos penetrados.

Este modelo depende tanto de la teoría como del *path loss* medido. El *path loss* medido es una buena forma de saber el comportamiento del modelo. Sin embargo este modelo no puede ser utilizado para predecir el nivel de señal recibido, dado el requerimiento de medidas del *path loss* reales [CRAN04].

#### 4.2.1.9 Multi-Wall Model

Este modelo está caracterizado por un exponente de  $n=2$ , como *path loss* en espacio libre; junto con factores de pérdida relacionados con el número de plantas ( $n_f$ ) y muros ( $n_w$ ) que interceptan la línea en visión directa a la distancia ( $d$ ) entre los terminales [RANV04].

La fórmula utilizada es la siguiente:

$$PL_{MW} = PL_1 + 20\text{Log}(d) + n_f a_f + n_w a_w$$

Ecuación 10 Modelo de pérdida de trayecto Multi-Wall

$PL_1$ : *path loss* a 1 metro.

$a_f$ : factor de atenuación de suelos.

$a_w$ : factor de atenuación de muros.

$n_f$ : número de suelos atravesados.

$n_w$ : número de muros atravesados.

## 4.2.2 Modelos Teóricos de propagación de ondas electromagnéticas

Se basan en principios fundamentales de la física en cuanto a propagación de ondas de radio y los fenómenos que la rodean. Pueden ser aplicados en diferentes entornos sin afectarles a su precisión. En la práctica su implementación requiere enormes bases de datos de características relativas al entorno, las cuales son imposibles o inviables de obtener de manera práctica.

Los algoritmos usados por los modelos deterministas son generalmente muy complejos y computacionalmente poco eficientes. Por esta razón su implementación se restringe a pequeñas áreas. Por el contrario, si su implementación es correcta, proporcionan gran precisión en su predicción comparados con los modelos empíricos.

En la actualidad existen diferentes modelos teóricos siendo los más populares los basados en Ray-tracing y FDTD (Finite-Difference Time-Domain).

### 4.2.2.1 Modelos basados en Ray-Tracing

El algoritmo de ray-tracing **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.,** [PL95] calcula todos los posibles caminos desde el transmisor al receptor. En los modelos básicos de ray-tracing, la predicción se basa en cálculos de transmisión en espacio abierto complementados con el efecto de reflexión de las paredes, teniendo en cuenta una única reflexión. Los algoritmos de ray-tracing más complejos incluyen mecanismos de difracción, dispersión difusa y penetración a través de diversos materiales.

En conclusión, el nivel de señal en un punto determinado se obtiene mediante la suma de los componentes de todos los caminos posibles existentes entre transmisor y receptor. Además de las pérdidas de propagación, en estos modelos se pueden predecir de manera fiable la dispersión en el tiempo de la señal.

Hoy en día los modelos de ray-tracing están considerados entre los más precisos de entre los modelos de predicción de potencia de campo [NNP00a]; sin embargo, requieren una representación muy detallada del área a analizar. La precisión del modelo depende en gran medida de la precisión y completitud/complejidad de la base de datos asociada a la representación. Por otro lado, el tiempo de computación depende en modo exponencial de estos detalles. Así, el tiempo de computación de un área reducida pero muy detallada puede ser mucho mayor que el de un área mayor pero con menor nivel de detalle.

### 4.2.2.2 Modelos FDTD

Las características de la propagación de radio se pueden derivar resolviendo directamente las ecuaciones de Maxwell relativas a propagación de ondas electromagnéticas. El método FDTD (Finite-Difference Time-Domain) es probablemente el método más utilizado para la obtención de una solución numérica

de las ecuaciones de Maxwell [PL95]. En este método las ecuaciones de Maxwell se aproximan por medio de un conjunto finito de ecuaciones diferenciales. Antes de realizar los cálculos es necesario definir una cuadrícula específica (regular o irregular) sobre el área de interés. Una vez que estas condiciones iniciales han sido definidas, el algoritmo FDTD emplea las diferencias centrales para aproximar las derivadas tanto en el espacio como en el tiempo. En los nodos de la cuadrícula la solución se determina iterativamente, resolviéndose de este modo las ecuaciones de Maxwell directamente.

Al igual que los modelos basados en ray-tracing, los modelos FDTD son muy exigentes computacionalmente. El tiempo de computación depende proporcionalmente del tamaño del área a ser analizada, pero no significativamente de los detalles incluidos en su descripción. Sin embargo el número de nodos de la cuadrícula está exponencialmente relacionado al tamaño del área y la frecuencia de operación.

La precisión del modelo FDTD es comparable a la de los modelos basados en ray-tracing; y la predicción es tan precisa como pueda serlo la base de datos de descripción del área.

Debido a su complejidad computacional, los modelos FDTD son aconsejables sólo en tareas de predicción de campo en pequeñas áreas [NNP00a]. Para áreas de mayor tamaño los modelos de ray-tracing son más aconsejables.

### **4.2.3 Otros modelos de propagación de ondas electromagnéticas**

Existen modelos que son una mezcla de empíricos y teóricos, y otro tipo de modelos como el siguiente, que utilizan diversas técnicas.

#### **4.2.3.1 Modelo ETF-ANN**

El problema principal que presentan los modelos empíricos es su falta de precisión. Por otro lado, los modelos teóricos se caracterizan por su falta de eficiencia. Se puede alcanzar un compromiso entre ambos problemas mediante los modelos de red ANN (Artificial Neural Network) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Este modelo está basado redes neuronales de perceptrón multinivel. La implementación de los modelos ANN requiere una base de datos de la planta en el que todas las zonas son clasificadas en diferentes categorías, por ejemplo, muros, pasillos, ventanas, etc..

Al modelo hay que proporcionarle en primer lugar las categorías de objetos que existen en el entorno; también hay que proporcionarle la distancia normalizada entre emisor y receptor; y finalmente información sobre el número y tipo de materiales que se va a encontrar de los diferentes tipos de las categorías.

La salida del modelo es el nivel de campo resultante.



Para determinar los parámetros del modelo, hay que proporcionarle datos de medidas tomadas sobre el terreno (datos de entrenamiento).



# CAPÍTULO 5

## REQUISITOS DEL MODELO DE COBERTURA EN REDES INALÁMBRICAS

---

En el Capítulo 3, se revisaron los diferentes tipos de construcción de modelos. En el Capítulo 4, se presentan varios modelos de propagación indoor para redes inalámbricas. De entre los modelos presentados, algunos son modelos que intentan pronosticar la cobertura en redes inalámbricas con unas fórmulas obtenidas de la experiencia en parte o totalmente (modelos empíricos), que sólo se ajustan de forma genérica al entorno exacto dónde se quiere aplicar el modelo. Otro tipo de modelos (teóricos) usan las leyes de la física para calcular los resultados en el entorno.

En este capítulo se identifican los requisitos que debe cumplir el modelo propuesto. Estos requisitos afectan básicamente al diseño y a la construcción del mismo.

### 5.1 Objetivos del modelo

La finalidad principal del modelo es que permita obtener el nivel de cobertura para poder seleccionar la ubicación óptima de puntos de acceso inalámbricos en el interior de edificios. Los edificios pueden tener varias plantas y por supuesto, varias habitaciones o salas en cada planta.

No se pretende con este modelo que tenga la capacidad de encontrar la ubicación óptima por sí mismo (véase líneas de investigación futuras); si no que permita al usuario comprobar la cobertura que se obtendría a partir de la ubicación de ciertos puntos de acceso.

### 5.2 Tipo de modelo

Se pretende realizar un modelo matemático determinista de simulación numérica de cobertura en redes inalámbricas, que use modelos geométricos tridimensionales sin mucho nivel de detalle del entorno donde se quiere estudiar la cobertura inalámbrica, y que tenga en cuenta todos los fenómenos que influyen en la transmisión de señales de radiofrecuencia, implícita o explícitamente.

En el modelo tridimensional se deben tener en cuenta los distintos componentes o materiales de que están formadas cada una de las partes que conforman el entorno de estudio.

Para determinar la propagación en el interior, se puede utilizar alguno (o más de uno) de los modelos de propagación en línea de visión (LOS) INDOOR. Estos modelos de propagación pueden ser teóricos o empíricos.

### **5.3 Ajustado a casos reales**

Se pretende que el modelo se pueda aplicar a entornos reales (recintos existentes) para determinar niveles de cobertura a partir de puntos de acceso dispuestos por el modelo geométrico tridimensional del recinto; o para encontrar la situación óptima de colocación de los puntos de acceso.

#### **5.3.1 Capacidad de importar la geometría del recinto**

En el modelo se debe poder importar la geometría tridimensional de los recintos en los que se quiere estudiar la cobertura inalámbrica, que se hayan modelado utilizando herramientas de modelado estándar existentes. Cuanto más usada sea la herramienta de modelado, más probable es encontrar un modelo tridimensional del entorno, y evitar así el tener que introducirlo.

El modelo se basa en datos geométricos del entorno importados, por lo que es imprescindible obtener el modelo tridimensional del recinto mediante herramientas externas.

#### **5.3.2 Capacidad de importar las propiedades de los materiales del recinto**

Además de importar la geometría del recinto, se deben obtener características especiales de los materiales que lo forman (atenuación al ser atravesados, coeficiente de reflexión, etc.), los parámetros adecuados para el modelo de propagación en LOS utilizado, y cualquier otra información necesaria. Estos datos, además de introducirse interactivamente en el prototipo, también podrán ser almacenados y cargados en bloque.

### **5.4 Uso de radiosidad**

El núcleo del modelo que se pretende obtener, está en la forma de calcular la energía que llega a cada punto del entorno: el uso de la técnica de radiosidad, y en particular una simplificación que hace que los cálculos sean menos costosos computacionalmente: radiosidad por refinamiento progresivo.

El modelo de radiosidad es un método para la descripción de reflexiones difusas. Se utiliza en representación realista de imágenes, y se basa en la ley de conservación de la energía. En este método, las transferencias de energía radiante de cada cara deben estar sujetas a las leyes de conservación de la energía.

La energía que ha radiado cada antena en un momento dado, debe permanecer constante, y por lo tanto se debe repartir entre todos los puntos del modelo geométrico tridimensional.

Cada superficie a la que le llega señal, se debe comportar como un emisor de una parte de la energía recibida; por lo que el sistema deberá realizar cálculos de energía emitida iterativos.

Se debe establecer una condición de parada basada en que las variaciones de energía en cada iteración no sobrepasen un límite.

## **5.5 Coste computacional aceptable**

El coste computacional de los cálculos necesarios debe ser aceptable en los sistemas actuales. No se trata de obtener un modelo en tiempo real, pero los tiempos de cálculo no deberán exceder de unas pocas horas para entornos reales de un edificio con varias plantas.

## **5.6 Requisitos del prototipo**

Para comprobar la validez del modelo, el prototipo que implemente el modelo se pretende que cumpla también una serie de requisitos, que se muestran a continuación.

### **5.6.1 Interactivo**

Como se especificó en el apartado 5.1, uno de los principales usos que se prevén para el modelo es la ubicación óptima de puntos de acceso. Si los resultados obtenidos no satisfacen las necesidades, o si se desea buscar configuraciones mejores, será preciso realizar pruebas y ensayos modificando la situación de los puntos de acceso, o modificando parámetros del sistema.

El prototipo debe permitir realizar cambios y modificaciones en los datos, que serán tenidos en cuenta inmediatamente para nuevos cálculos, y por tanto, responder a las entradas de los usuarios. Por ejemplo, se deben poder ajustar parámetros de propagación, propiedades de los materiales, los puntos de acceso se deben poder reconfigurar en cuanto a potencia, situación, características de la antena, etc.

### **5.6.2 Interfaz gráfica**

El sistema debe permitir, en un entorno gráfico, la realización de todas las operaciones: importación de modelos geométricos tridimensionales, ajuste de parámetros, obtención de resultados en diferentes vistas, almacenamiento de modelo completo (modelo tridimensional junto a características de propagación).

### 5.6.3 Exportación de datos

Los datos introducidos en el sistema se deben poder almacenar para su posterior carga y realización de nuevos cálculos.

Los resultados de la simulación deben ser exportables en diferentes vistas: imágenes, modelo tridimensional, valores de señales.

### 5.6.4 Usabilidad

La definición formal aplicada por la organización estándar internacional ISO (*International Standards Organization*) establece que la usabilidad es la “*eficacia, eficiencia y satisfacción con la que un conjunto de usuarios pueden afrontar un conjunto de tareas en un entorno particular*” **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

La definición anterior tiene un significado operacional pero también requiere una cierta medida de eficacia, eficiencia y satisfacción para su desempeño. El concepto de usabilidad es asociado muchas veces a las aplicaciones cuya interfaz de usuario juega un papel importante, sin embargo, es un concepto amplio que debe estar aplicado al desarrollo de cualquier producto software.

El prototipo deberá ser diseñado para que integre todos los aspectos relacionados con la usabilidad. Esta característica permitirá que el sistema sea eficiente, ofrezca un entorno visual agradable, sea fácil de aprender con un nivel de abstracción adecuado para la retención de ideas, sea fácil de usar, incorpore mecanismos para poder tratar y subsanar los errores rápidamente y ofrezca un buen grado de satisfacción por parte del usuario.

### 5.6.5 Calibrado del modelo y comprobación de resultados

El prototipo debe poder ser calibrado con medidas realizadas en el entorno, que permitan ajustar los parámetros de propagación al entorno real.

Por otra parte, el prototipo debe tener la capacidad de aceptar medidas de señal reales, para que se puedan comparar con los resultados de señal calculados en los diversos modelos de propagación, y aplicados al entorno modelado.

# CAPÍTULO 6

## DISEÑO DEL MODELO

---

---

Después de analizar los diferentes modelos de propagación, se han especificado en el capítulo anterior los requisitos del modelo que se estima sería conveniente conseguir.

Con el fin de construir un sistema que cumpla los requisitos anteriormente mencionados, en este capítulo se describe la arquitectura del sistema que forma el núcleo de la presente tesis doctoral. Una vez mostrada esta arquitectura se analizarán sus componentes, propiedades y características. Posteriormente, en los capítulos siguientes, se presentará el diseño del prototipo y la implementación del prototipo desarrollado para el modelo propuesto.

### 6.1 Modelo de Simulación Wi-Fi

El objetivo general del prototipo es llevar a cabo un modelo de predicción de cobertura para redes inalámbricas que permita visualizar los límites y calidad de las conexiones de un usuario; así como planificar la instalación en un mismo edificio de múltiples Puntos de Acceso sin causar interferencias entre ellos.

El prototipo, se implementa en una herramienta de simulación que debe permitir, a partir de un modelo geométrico tridimensional de la estructura de un edificio tomado como entrada, obtener una relación de intensidades de señal recibida en cada punto; y permitir la visualización gráfica de los niveles de cobertura obtenidos en dichos puntos.

Tomando como referencia los fundamentos teóricos incluidos en capítulos anteriores, se ha realizado las siguientes decisiones en cuanto a las técnicas y modelo en que se basa la herramienta de simulación.

### 6.2 Obtención del modelo geométrico tridimensional

No se pretende dotar al prototipo de la capacidad de modelado geométrico tridimensional del recinto, por lo se debe poder importar dicho modelo de herramientas específicas de modelado tridimensional. Se elige el producto 3D Studio por su popularidad y por ser suficiente para modelar los recintos con el detalle precisado.

## 6.3 Propagación en Espacio Libre (LOS)

Se utilizará el *Log-Normal Shadowing Path Loss Model* para el cálculo de la pérdida de señal por la propagación en el aire. La decisión de utilizar este modelo se justifica en el hecho de que se trata de una técnica de estimación de pérdidas de propagación muy práctica y utilizada, que tiene en cuenta de alguna forma todos los factores que influyen en la propagación.

Además, el hecho de que el modelo se pueda calibrar, es decir, que se puedan introducir medidas de campo para obtener todos los parámetros empíricos del modelo, deberá permitir acercar los resultados de predicción en espacio libre en gran medida a la realidad.

### 6.3.1 Ajuste del Modelo de Cobertura basado en mediciones

Para ajustar el modelo al recinto en donde se pretende aplicar, se pueden tomar una serie de medidas que introducidas en el modelo, van a permitir una respuesta más ajustada a la realidad.

Las medidas se deben tomar con un punto de acceso y un dispositivo (portátil o, PDA con WiFi) que permita medir la señal recibida. Si proporciona la medida en dBm se introduce directamente.

#### 6.3.1.1 Distancia de medida

Hay que tener en cuenta que la distancia real de medida es mayor que la distancia entre los puntos medida en el plano del suelo, debido a diferente altura de los elementos. Esto tiene importancia sobretodo en distancias muy cortas donde la proporción del error puede ser elevada. La distancia real se calcula como:

$$x = \sqrt{h^2 + r^2}$$

Siendo:

- $x$  — distancia medida en el plano del suelo
- $h$  — diferencia de altura
- $r$  — distancia real

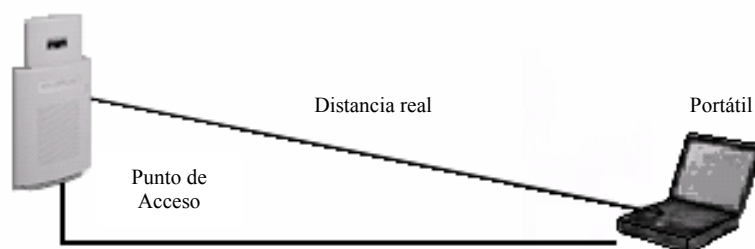


Figura 50 Distancia real desde el Punto de Acceso al receptor



### 6.3.1.2 Medidas de corta distancia con LOS

Para el ajuste correcto del modelo se deben tomar una serie de medidas en corta distancia. Las medidas se deberían tomar en la dirección en la que la antena emite con máxima potencia (lóbulo principal).

Como distancia de referencia, se suele tomar 1 metro, para obtener la pérdida por trayecto  $PL(d_0)$ .

Adicionalmente se deben tomar una serie de medidas a diferentes distancias en la dirección de lóbulo principal, que permitirán ajustarse a las características radioeléctricas del recinto.

### 6.3.1.3 Medidas de larga distancia con LOS

Siempre que sea posible, sería conveniente realizar una medición a larga distancia, entendiendo como largas distancias de más de 10 metros.

En el caso de que para obtener distancias de más de 10 metros sea necesario hacer las mediciones en pasillos, es probable que los resultados sean mejores a mayores distancias que a corta distancia, debido al efecto que hace el pasillo sobre la señal.

### 6.3.1.4 Medidas de corta distancia con NLOS

Si se quieren ajustar los parámetros de pérdida por absorción al atravesar los materiales (paredes), se pueden realizar medidas a tal efecto. En cualquier caso, siempre es posible utilizar valores frecuentemente utilizados, que el modelo tenga almacenados.

### 6.3.1.5 Procesado de datos

Una vez obtenidos los datos, se deben procesar para obtener la media y la desviación típica. En el caso de las medidas con LOS, la media será la variable  $n$ .

Los datos obtenidos de las mediciones con NLOS, se pueden promediar también para corregir (ajustar) las pérdidas por atravesar obstáculos.

Por ejemplo, en la calibración del modelo, realizada en el edificio de Ciencias, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tipo de Medida	Distancia (d)	PR(d)
Fase 1 (Aula) AP1	$d_0 = 1$ metro	-33 dBm
	1,65 m	-36 dBm
	2,50 m	-39 dBm
	4,20 m	-41 dBm
	5,90 m	-44 dBm
	6,75 m	-46 dBm
	8,45 m	-48 dBm
Fase 2 (Pasillo)	12,25 m	-50 dBm
	14,70 m	- 50 dBm

<b>AP2</b>	<b>17,20 m</b>	<b>-56 dBm</b>
	<b>22,30 m</b>	<b>-51 dBm</b>
	<b>26,20 m</b>	<b>-53 dBm</b>
	<b>33,30 m</b>	<b>-54 dBm</b>
	<b>39,00 m</b>	<b>-59 dBm</b>
	<b>45,40 m</b>	<b>-63 dBm</b>

La representación gráfica de estos valores representa la función logarítmica en función de la distancia esperada como en todos los modelos vistos.

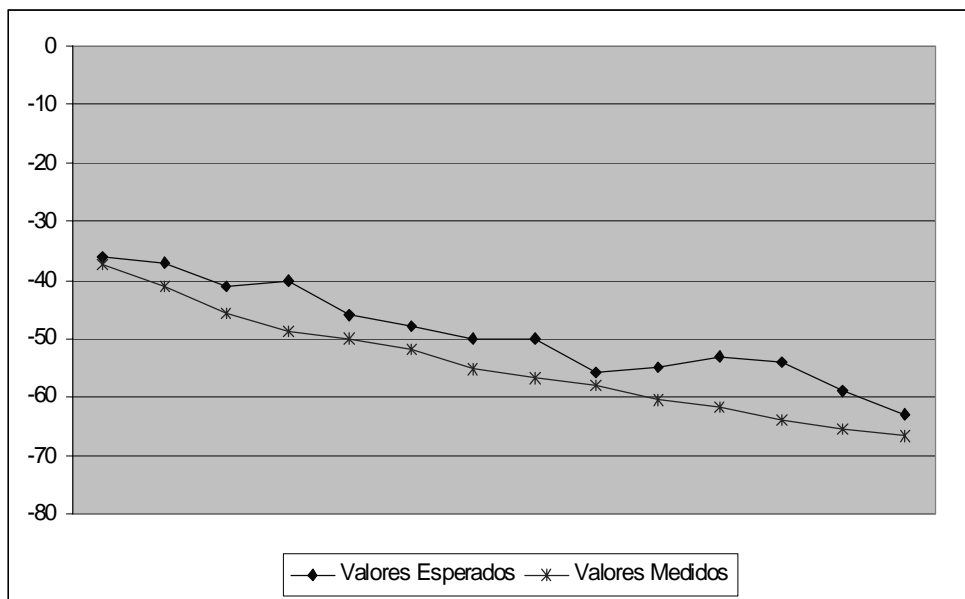


Figura 51 Relación entre valores medidos y curva logarítmica esperada

A partir de estos datos hemos calculado el valor de la variable de pérdida de propagación como la media aritmética del resultado de su resolución, según la fórmula general del modelo:

$$PR(d) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)$$

Despejando  $n$ :

$$n = \frac{PR(d) - PL(d_0)}{10 \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)}$$

Y aplicando la fórmula para todas las medidas realizadas, se obtiene la siguiente tabla:

<b>Distancia (d)</b>	<b>PR(d)</b>	<b>n</b>	<b>Varianza</b>
<b>1,65 m</b>	<b>-36 dBm</b>	<b>0,065245183</b>	<b>-1,42967025</b>

2,50 m	-39 dBm	0,159176003	-4,10516392
4,20 m	-41 dBm	0,498599432	-4,6942191
5,90 m	-44 dBm	0,539596408	-8,70056233
6,75 m	-46 dBm	1,078094905	-3,89109632
8,45 m	-48 dBm	1,390285063	-3,87803535
12,25 m	-50 dBm	1,849831351	-5,16294208
14,70 m	-50 dBm	1,984439469	-6,77569014
17,20 m	-56 dBm	2,841715428	-2,16500067
22,30 m	-51 dBm	2,966270699	-5,46200856
26,20 m	-53 dBm	2,836602583	-8,88768206
33,30 m	-54 dBm	3,19713289	-10,008845
39,00 m	-59 dBm	4,136767978	-6,40649133
45,40 m	-63 dBm	4,971167559	-3,75058806
		2,036780354	6,38278402

Al introducir la variable  $n$  media en el modelo, éste quedaría como:

$$P(R) = 53 - 20,37 \cdot \log(d)$$

La parametrización de variable  $X_\sigma$  se ajusta al valor de la desviación típica de la serie obtenida. No obstante, se deja a consideración del usuario su ajuste ya que puede modelar efectos no previstos en el trayecto como obstáculos humanos, interferencias silenciosas, etc.

La **varianza**  $S^2$ , se define como la media de las diferencias cuadráticas de  $n$  puntuaciones con respecto a su media aritmética,

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \text{ por tanto } S^2 = 6.38$$

Para que la medida de dispersión sea de la misma dimensionalidad que las observaciones, bastará con tomar su raíz cuadrada. Por ello se define la **desviación típica**  $S$ , como:

$$S = \sqrt{S^2} \text{ luego } X_\sigma = S = 2.53$$

Con estos datos, el modelo de propagación directa que se va a utilizar para calcular la pérdida de trayecto en el espacio libre será:

$$P(R) = 53 - 20,37 \log(d) + \text{Aleatorio}(2.53)$$

La medida aleatoria nos permite simular variaciones de señal causadas por el entorno radioeléctrico. Aunque la señal de cobertura sea aleatoria, nos da una indicación de las variaciones de señal que se producen en las zonas donde  $X_\sigma$  es significativa respecto al resto de la señal.

## 6.4 Propagación en Línea con obstáculos: Penetración

Como hemos visto, la penetración o transmisión se produce cuando la señal se encuentra en su camino con un obstáculo que es, por así decirlo, transparente para las

ondas de radio. Cuando la señal penetra un obstáculo experimentará una pérdida, que será función del grosor del objeto y del material del que está compuesto.

El criterio para el modelado de este fenómeno será el siguiente:

1. Detección de los obstáculos existentes en el trayecto (colisiones).
2. Modelado de las pérdidas estimadas de los diferentes materiales de la escena (pérdida de penetración).
3. Atenuación de la señal directa (calculada con el método de propagación directa seleccionado) con la suma de todas las pérdidas de penetración detectadas.

Se descarta tener en cuenta en los cálculos el grosor del objeto, debido a que ello traería consigo un mayor grado de precisión en los datos del modelo geométrico 3D, y a que se considerará implícitamente al establecer los parámetros del material.

También se descarta modelar la propagación de la señal por el interior del material (excepto la pérdida de penetración), por la falta de referencias y la complejidad que añadiría al modelo.

Se considera que una señal incidente a un objeto penetrable a través de una cara  $x$ , va a realizar su trayectoria de salida por el mismo objeto a través de otra cara distinta  $y$ . Si el material del objeto se ha modelado para provocar una pérdida de penetración de  $n$  dB, cada colisión en una de sus caras agregará  $n/2$  dB a las pérdidas de penetración del trayecto.

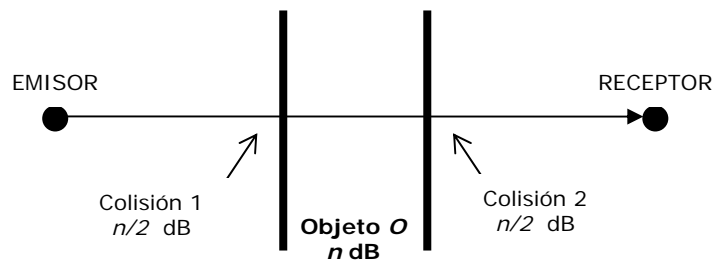


Figura 52 Modelado de pérdida de penetración en cada cara

A continuación se detalla el algoritmo que se utilizará para la detección de colisiones en el trayecto de la señal.

### 6.4.1 Colisiones

Sólo veremos la determinación de colisiones con planos y más específicamente con triángulos ya que así estarán definidas las superficies en que se componen nuestros objetos tridimensionales.

Trabajaremos en un espacio afin [Col03]:  $O(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$

### 6.4.1.1 Colisión con un plano

El tratamiento de colisiones va a consistir en determinar la existencia o no de colisión y, en caso afirmativo, encontrar el punto de colisión sobre el plano.

#### 6.4.1.1.1 Condición de existencia de una colisión

Sea  $M$  un plano de ecuación:

$$M \equiv \mathbf{n} \cdot \mathbf{x} = k \quad (\text{donde } \mathbf{n} \text{ es el vector normal unitario al plano})$$

y  $\mathbf{x}_n$ , la posición de un emisor en el espacio.

Supongamos que el punto de emisión es exterior al plano, es decir:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_n \neq k.$$

Diremos que existe colisión con el plano en el trayecto directo de propagación entre el emisor y un receptor situado en  $\mathbf{x}_{n+1}$ , si el plano contiene la posición  $\mathbf{x}_{n+1}$  o le separa de la  $\mathbf{x}_n$ .

Como la condición de que  $M$  contiene  $\mathbf{x}_{n+1}$  es obviamente  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_{n+1} = k$ , y la condición de que  $M$  separa  $\mathbf{x}_{n+1}$  de  $\mathbf{x}_n$  es que

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_n - k > 0$$

y

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_{n+1} - k < 0$$

sean de signos opuestos (puesto que el plano  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} - k = 0$  divide el espacio en dos regiones disjuntas  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} - k > 0$  y  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} - k < 0$ ), la condición general de colisión es:

$$(\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_n - k)(\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_{n+1} - k) \leq 0$$

donde la desigualdad estricta tiene lugar si, y sólo si,  $\mathbf{x}_{n+1}$  es exterior al plano.

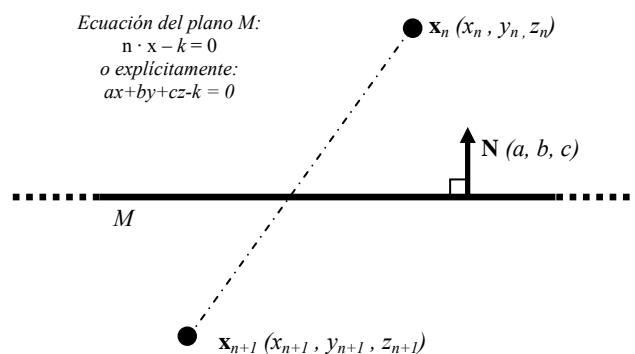


Figura 53 Colisión con un plano

De forma explícita, si

$$M \equiv ax + by + cz - k = 0$$

donde

$$n=(a,b,c)$$

y

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1$$

la condición general de colisión con el plano M en la iteración de  $x_n = (x_n, y_n, z_n)$  a  $x_{n+1} = (x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$  se escribe:

$$(ax_n + by_n + cz_n - k)(ax_{n+1} + by_{n+1} + cz_{n+1} - k) \leq 0$$

Ecuación 11 Condición de colisión con un plano

#### 6.4.1.1.2 Localización del punto de colisión

El punto de colisión es, por definición, el punto de intersección de la recta  $r_{n+1} \equiv x_{n+1}x_n$  y el plano M.

La ecuación de la recta  $r_{n+1}$  se puede expresar de forma paramétrica como el lugar geométrico de los puntos  $x(x,y,z)$  que verifican:

$$x = (x_{n+1} - x_n) \cdot t + x_n$$

El valor de  $t$  para el cual  $x$  está sobre el plano se obtiene imponiendo que  $x$  verifique su ecuación  $n \cdot x = k$ , es decir:

$$n \cdot [(x_{n+1} - x_n) \cdot t + x_n] = k$$

Resulta pues:

$$t = \frac{k - n \cdot x_n}{n \cdot (x_{n+1} - x_n)}$$

donde es evidente que  $n \cdot (x_{n+1} - x_n)$  nunca se anula en caso de colisión por ser  $x_n$  exterior al plano.

Sustituyendo el valor de  $t$  en la ecuación de la recta  $r_{n+1}$  obtenemos las coordenadas del punto  $x_c$  de colisión, es decir:

$$x_c = \frac{1}{n \cdot (x_{n+1} - x_n)} \cdot [(k - n \cdot x_n)x_{n+1} - (k - n \cdot x_{n+1})x_n]$$

Ecuación 12 Obtención del punto de colisión con un plano

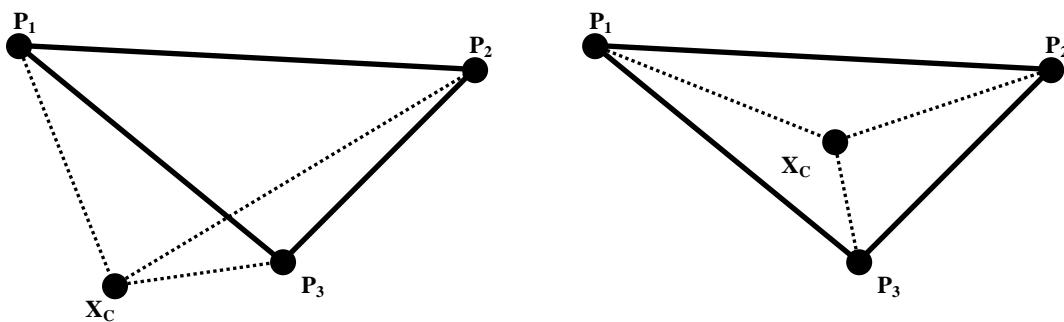
### 6.4.1.2 Colisión con un triángulo

Un triángulo define un plano y por lo tanto, lo visto anteriormente contiene parcialmente el estudio de la colisión que nos ocupa, es decir la de un trayecto de propagación con un triángulo.

#### 6.4.1.2.1 Condición de existencia de la colisión

Una colisión con un triángulo implica una colisión con el plano que él define. Hay colisión con el triángulo si el punto  $x_c$  de intersección con dicho plano anteriormente estudiado, pertenecen al triángulo. El problema es pues el de obtener las condiciones que aseguran dicha situación.

Este problema se resuelve con una idea muy simple. Si la suma de las tres áreas de los triángulos formados por el punto de intersección  $x_c$  y las aristas del triángulo dado es igual que la área de dicho triángulo, nuestro punto de intersección pertenecerá al triángulo, y por lo tanto habrá colisión. En caso contrario nuestro punto estará fuera, y no habrá colisión.



- (1) El punto esta fuera del triángulo: la suma de las áreas parciales es más grande que el área del triángulo. (2) La suma de la áreas parciales es igual que el área del triángulo.

Figura 54. Detección de la colisión con un triángulo

Denotando por  $p_1, p_2, p_3$  los vértices del triángulo dado, por  $x_c$  el punto de intersección con el plano  $M$ , y por  $A(p, q, r)$  el área del triángulo de vértices  $p, q, r$ , se tiene pues la relación:

$$A(x_c, p_1, p_2) + A(x_c, p_2, p_3) + A(x_c, p_3, p_1) - A(p_1, p_2, p_3) \geq 0$$

donde la igualdad tiene lugar si, y solo si,  $x_c$  es interior al triángulo  $\{p_1, p_2, p_3\}$ , es decir, si la trayectoria de la señal en cuestión colisiona con él.

Como el módulo del producto vectorial de dos vectores es el doble del área del triángulo que forman, se tiene

$$A(p, q, r) = \frac{1}{2} \cdot |(p - q) \times (q - r)|$$

Recordemos que, para dos vectores  $u = (u_x, u_y, u_z)$  y  $v = (v_x, v_y, v_z)$ , es:

$$|u \times v|^2 = (uxvy - uyvx)^2 + (uyvz - \square ode)^2 + (uzvx - uxvz)^2$$

Así, denotando los lados del triángulo por

$$a1 \equiv p1 - p2, \quad a2 \equiv p2 - p3, \quad a3 \equiv p3 - p1$$

la condición de colisión puede escribirse como:

$$|(xc - p1) \times a1| + |(xc - p2) \times a2| + |(xc - p3) \times a3| - |a1 \times a2| = 0$$

Ecuación 13 Ecuación de colisión con un triángulo

### 6.4.2 Tratamiento de Colisiones

Una vez conocida la existencia de colisión de la trayectoria de la señal con el triángulo, su tratamiento posterior se reduce a la aplicación de la atenuación o pérdida que produce el material debido al fenómeno de penetración. Existen multitud de estudios sobre pérdidas estimadas en diferentes materiales en WLAN. La siguiente tabla es un extracto del documento publicado por Ericsson “*Wireless LAN User’s Guide version 4.2*” [Eri99] y en ella se presentan las pérdidas predecibles en la penetración de diferentes tipos de materiales.

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

Tabla 7 Pérdidas por penetración en diversos materiales

### 6.5 Simulación de Multitrayecto: Radiosidad

Se utilizará la técnica de *Radiosidad por Refinamiento Progresivo* para simular la propagación multitrayecto producida por la reflexiones de la señal emitida, en el camino hacia un receptor, y debida a colisiones con obstáculos (paredes, muros, muebles, etc.).

El criterio seguido para el modelado de este fenómeno en el modelo será el siguiente:

#### 6.5.1 Energía reflejada inicial

Se entiende por *energía inicial* la energía reflejada por el conjunto de las caras de la escena como consecuencia de la propagación directa de la radiación de los Puntos de



Acceso. Cuando se produce una radiación de señal, se definen las siguientes energías en cada cara:

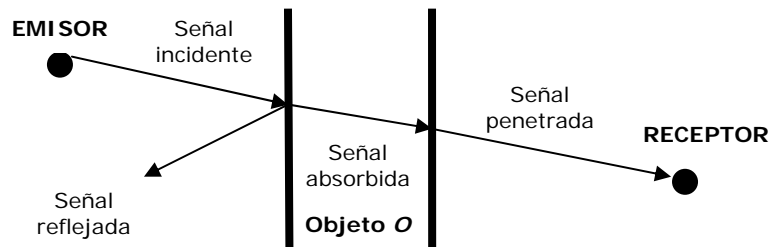


Figura 55 Descomposición de la señal incidente a una cara

El resultado o transformación que sufre la señal incidente puede hacer que la señal sea absorbida, reflejada o una combinación de ambas. Esta reacción depende principalmente de las propiedades físicas del obstáculo y de la señal.

Si se parametriza cada material de la escena con un parámetro que denominaremos *reflectividad* y que representa el porcentaje de la señal incidente no penetrada que se refleja, tenemos que:

$$Incidente = Penetrada + Absorbida + Reflejada$$

$$Reflectividad = \frac{\text{reflejada}}{\text{No penetrada}}$$

$$N = \text{No Penetrada} = Incidente - Penetrada = Absorbida + Reflejada$$

$$Reflejada = N * \text{reflectividad}$$

Hay que tener en cuenta que el fenómeno de reflexión sólo se produce en aquellas caras del objeto sobre las que colisiona la señal de manera directa, ya que las caras de objeto que quedan orientadas “de espaldas” al punto de acceso no reciben directamente la colisión sino que le llega la señal penetrada y simplemente la dejan pasar.

No se han modelado los fenómenos de reflexión en la cara saliente de un objeto atravesado, ni la refracción al entrar y salir del objeto.

Para seleccionar qué caras son susceptibles de reflejar la señal procedente de un emisor utilizamos el vector normal a la superficie y el algoritmo de detección de colisión visto en el apartado 6.4.1.1.

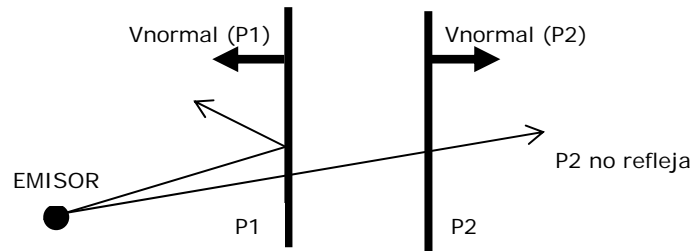


Figura 56 Señal reflejada y penetrada

Tal y como se ilustra en la *Figura 56*, el plano P1 no corta al emisor y su normal luego será un obstáculo para la señal radiada. Por el contrario P2 si corta el trayecto entre su normal y emisor por lo que sólo provocará pérdida de penetración al paso de la señal.

Para el cálculo de la señal reflejada se tomará como referencia el centro de cada cara. La medición efectuada en el centro se extrapolará posteriormente a toda la cara a través del cálculo del área de la superficie.

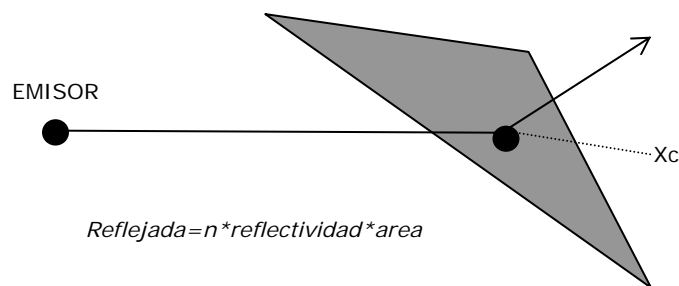


Figura 57 Extrapolación a todo el triángulo de la energía del punto central

La energía reflejada se emitirá a toda la escena aplicando el Modelo Log-Normal Shadowing Path Loss, pero teniendo en cuenta que la cara no es el origen de la señal sino que sólo la refleja. Al producirse una reflexión, se incrementa la distancia del trayecto recorrido por la señal en  $d_2$  metros, siendo  $d_2$  la distancia de la cara al sensor.

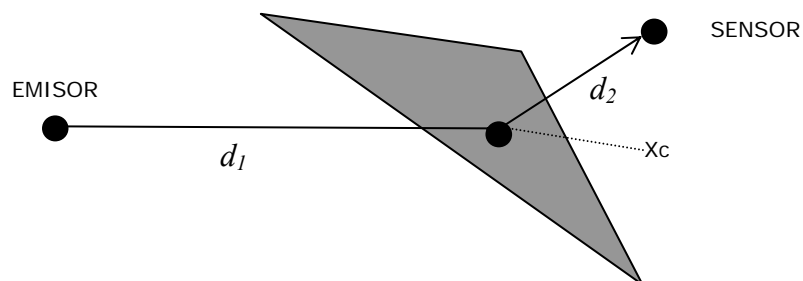


Figura 58 Incremento de distancia por reflexión de la señal

La pérdida de trayecto hasta la cara sería:

$$PL(d_1) = PL(d_0) + 10n \log(d_1/d_0) + X_\sigma$$

La pérdida de trayecto hasta el sensor sería:

$$PL(d_1+d_2) = PL(d_0) + 10n \log((d_1+d_2)/d_0) + X_\sigma$$

Sacando factor común  $d_1$  tendremos que:

$$PL(d_1+d_2) = PL(d_0) + 10n \log(d_1 (1+d_2/d_1)/d_0) + X_\sigma$$

$$PL(d_1+d_2) = PL(d_0) + 10n \log(d_1/d_0) + 10n \log(1+d_2/d_1) + X_\sigma$$

$$PL(d_1+d_2) = PL(d_1) + 10n \log(1+d_2/d_1)$$

Luego la pérdida de trayecto global vendrá dada de agregar a la pérdida registrada en  $d_1$  el sumando  $10n \cdot \log(1+d_2/d_1)$ .

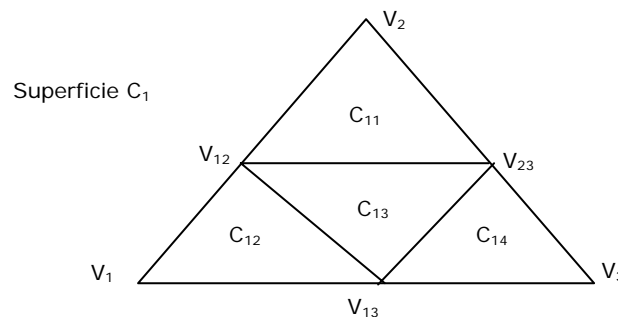
Dado que en la potencia de emisión de la cara ya se ha aplicado  $PL(d_1)$ , la pérdida de trayecto desde la cara hasta el sensor vendrá dada por la fórmula:

$$PL(d_2) = 10n \log(1+d_2/d_1)$$

Es evidente que la precisión de las medidas va a estar condicionada por el tamaño de la superficie; ya que a mayor tamaño, menos representativo del conjunto resulta el punto central, desvirtuándose las medidas. Es necesario por tanto realizar un proceso previo de división de las superficies del modelo de modo que su área no supere un valor dado definido como parámetro; que será fijado por el usuario en función de la precisión en las medidas que desee obtener.

La exigencia de una mayor precisión requiere menores tamaños de área y por tanto mayor número de superficies, lo que acarrea un mayor volumen de operaciones computacionales.

La división de superficies se ha llevado mediante un algoritmo iterativo que en cada paso divide un triángulo en 4 subtriángulos a partir del cálculo de los puntos medios de sus aristas; reduciendo por tanto a  $1/4$  el valor de la superficie máxima de partida.



**Figura 59** Descomposición de una cara triangular en 4

## 6.5.2 Descripción de Reflexiones Difusas y Ecuación de Radiosidad

Las caras se han considerado como si fuesen puntos de acceso de su energía reflejada con directividad horizontal frontal, considerando ésta la dirección de su normal. La emisión de las caras se considera de dos modos:

- Reflexión para medición sensorial: se radia a todos los sensores para comprobar el nivel de potencia de multitrayecto en cada sensor; que puede concluir un multitrayecto de  $n$  rebotes.
- Reflexión para realimentación de energía en las caras: las caras radian a otras caras su energía no disparada mediante radiosidad.

En este apartado se describe el desarrollo del proceso para llegar a la ecuación de radiosidad; así como el cálculo de los factores de forma y las aproximaciones realizadas para disminuir el tiempo de computación.

El método para la descripción de reflexiones difusas denominado modelo de Radiosidad, considera las transferencias de energía radiante entre las superficies sujetas a las leyes de conservación de la energía. En este modelo, necesitamos considerar las interacciones de la energía radiante entre todas las superficies en una escena. De esta manera, podemos determinar la cantidad diferencial de energía radiante  $dB$  que se emite en cada punto de la superficie en la escena para así sumar las contribuciones de energía en todas las superficies a fin de obtener la cantidad de transferencia de energía entre las superficies [Bos99].

En la siguiente figura podemos observar la energía radiante que se emite en el punto de la superficie en la dirección  $(\theta, \phi)$  en el ángulo sólido diferencial  $d\omega$  por tiempo de unidad por área de superficie unitaria, y que se denota por  $dB$ . Por tanto,  $dB$  tiene unidades de julios/(sg\*m<sup>2</sup>) o Watios/m<sup>2</sup>.

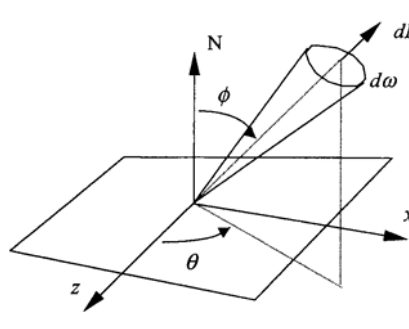


Figura 60 Energía radiante emitida por un punto

La intensidad de la radiación difusa en la dirección  $(\theta, \phi)$  se denota por  $I$  (se denomina *luminancia* si hablamos de luz visible). Ésta es la energía radiante por unidad de tiempo por unidad de área proyectada y por unidad de ángulo sólido, cuyas unidades son Watios/(m<sup>2</sup>\*estereorradián).

Para un elemento de superficie unitaria, el área proyectada perpendicular a la dirección de la transferencia de energía equivale a  $\cos \theta$ .

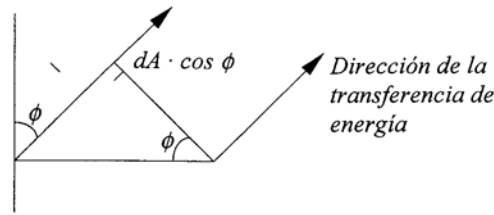


Figura 61 Dirección de la transferencia de energía

$$I = \frac{dB}{d\omega \cdot \cos \Phi}$$

Como hemos establecido que cada una de las superficies es un reflector difuso ideal o Lambertiano (la energía se refleja en todas las direcciones de la misma forma), podemos establecer la intensidad  $I$  como una constante para todas las direcciones de vista. De esta manera, y como se muestra en la *Figura 60*,  $dB/d\omega$  es proporcional al área de la superficie proyectada.

Para obtener la radiación total de la superficie es decir, el índice que indica la energía total que despidе, hemos de sumar la radiación para todas las direcciones. Necesitaremos la energía total  $B$  que emana de un hemisferio centrado en el punto central de la superficie, como se muestra en la siguiente figura:

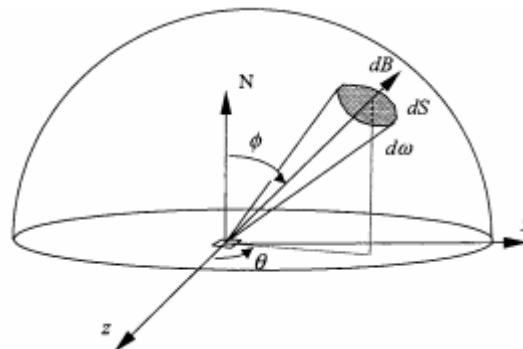


Figura 62 Semiesfera centrada en el centro del reflector difuso

Obtenemos  $B$  integrando sobre el hemisferio ( $h$ ):

$$B = \int_h dB$$

Teniendo en cuenta que para un reflector difuso  $I$  es constante, a partir de la expresión anterior que nos daba esta intensidad, esta energía  $B$  se puede expresar como:

$$B = \int_h I \cdot \cos \Phi d\omega = I \cdot \int_h \cos \Phi d\omega$$

Por otra parte, tenemos que el elemento diferencial del ángulo sólido  $d\omega$  se puede expresar como el diferencial de superficie entre el radio de la semiesfera al cuadrado según la siguiente expresión:

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} = \text{sen}\phi \, d\phi \, d\theta$$

de manera que sustituyendo este valor en la expresión anterior y simplificando la integral, obtenemos el valor final de la energía total que emana de un hemisferio centrado en el punto de la superficie denotada por  $B$ :

$$B = I \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos\phi \cdot \text{sen}\phi \, d\phi \, d\theta$$

Podemos definir un modelo para las reflexiones de energía de las diversas superficies estableciendo un encerramiento de las mismas, donde cada una de ellas se considera como una combinación de reflector y emisor.

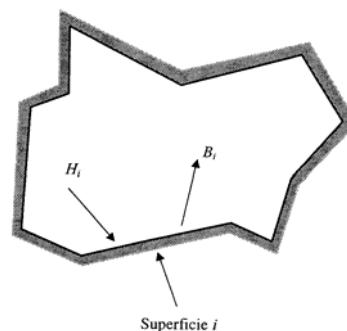


Figura 63 Encerramiento de superficies

Denominamos  $B_i$  al índice total de energía que emana de la superficie  $i$  por unidad de área.

La energía incidente  $H_i$  es la suma de las contribuciones de energía de todas las superficies en el encerramiento que llegan a la superficie  $i$  por unidad de tiempo por unidad de área, es decir,

$$H_i = \sum_{1 \leq j \leq n} B_j \cdot F_{j-i}$$

donde el parámetro  $F_{j-i}$ , es el factor de forma o factor de configuración para las superficies  $j$  e  $i$ , que se puede definir como la cantidad fraccional de energía radiante de la superficie  $j$  que llega a la superficie  $i$ .

Para una escena con  $n$  superficies en el encerramiento, la energía radiante de la superficie  $i$  se describe con la ecuación de *radiosidad*:

$$B_i = E_i + \rho_i \cdot H_i$$

donde  $E_i$  es el índice de energía que se emite desde la superficie  $i$  por unidad de área y  $\rho_i$  es la reflectividad (porcentaje de la energía incidente no penetrada que se refleja en todas las direcciones) de la superficie  $i$ , y no tiene dimensiones. Sustituyendo el valor de la energía incidente en la expresión anterior tenemos

$$B_i = E_i + \rho_i \cdot \sum_{1 \leq j \leq n} B_j \cdot F_{j-i}$$

Utilizando la relación de reciprocidad que hay entre los factores de forma y reordenando los términos de la expresión anterior, podemos despejar el índice de energía que se emite desde la superficie  $i$ ,

$$B_i - \rho_i \cdot \sum_{1 \leq j \leq n} B_j \cdot F_{i-j} = E_i$$

#### Ecuación 14 Ecuación de Radiosidad

Por lo tanto, la interacción de la energía entre parches en el encerramiento de superficies se puede especificar como un conjunto de ecuaciones simultáneas:

$$\begin{bmatrix} 1 - \rho_1 F_{1-1} & -\rho_1 F_{1-2} & \cdots & -\rho_1 F_{1-n} \\ -\rho_2 F_{2-1} & 1 - \rho_2 F_{2-2} & \cdots & -\rho_2 F_{2-n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ -\rho_n F_{n-1} & -\rho_n F_{n-2} & \cdots & 1 - \rho_n F_{n-n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix}$$

#### Ecuación 15 Ecuaciones simultáneas de radiosidad

Aparte de la energía de las otras superficies, también hay que considerar la contribución de una superficie a su propia energía, por lo que, como se ve en la matriz anterior, los términos de la diagonal no son simplemente 1.

En informática gráfica, hay que resolver este conjunto de ecuaciones para cada banda de longitudes de onda consideradas en el modelo de iluminación, ya que  $\rho_i$  y  $E_i$  dependen de la longitud de onda (no así en nuestro caso, al considerar una única banda de frecuencias). Sin embargo, no es necesario recalcular los factores de forma ya que son independientes de la longitud de onda y constituyen únicamente una función de la geometría.

El conjunto de ecuaciones se puede resolver utilizando el método de Gauss-Seidel **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** así obtendremos la radiosidad para cada superficie. Posteriormente se generan las superficies desde cualquier punto de vista utilizando cualquier algoritmo de detección de superficies visibles.

La radiosidad calculada para cada superficie corresponde a la intensidad de la superficie.

### Cálculo de los factores de Forma

Entendemos factor de forma como la proporción de energía emitida por una superficie que es interceptada por otra superficie.

Considerando dos diferenciales de superficie, podemos calcular el valor del factor de forma entre ellos:

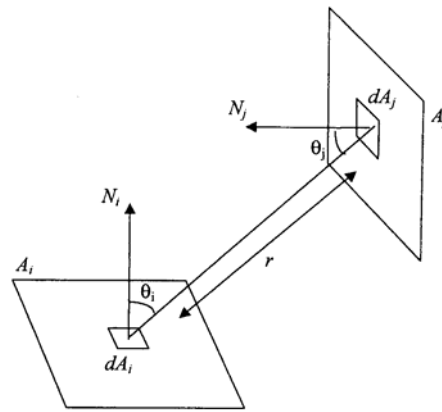


Figura 64 Rayo entre dos diferenciales de superficies difusas

Para el rayo entre las áreas diferenciales  $dA_i$ , y  $dA_j$ ,  $\theta_i$  es el ángulo que forma el rayo con la normal a  $A_j$ ,  $\theta_j$ , es el ángulo que forma el rayo con la normal a  $A_i$  y  $r$  es la longitud del rayo, o lo que es lo mismo, la distancia entre las dos superficies.  $H_{ij}$  es 1 ó 0, dependiendo de si  $dA_j$  es visible desde  $dA_i$ .

$$dF_{di-dj} = \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{\pi \cdot r^2} \cdot H_{ij} dA_j$$

Para determinar el factor de forma del área diferencial  $dA_i$ , al área finita  $A_j$ ,  $F_{di-j}$ , tenemos que integrar en el área de la superficie  $j$ ,

$$F_{di-j} = \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{\pi \cdot r^2} \cdot H_{ij} dA_j$$

Por último, el factor de forma de  $A_i$ , es el área media de la ecuación anterior sobre la superficie  $i$ ,

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{\pi \cdot r^2} \cdot H_{ij} dA_j dA_i$$

Estas ecuaciones se evalúan utilizando técnicas de integración numérica.

Si suponemos que el punto central en una superficie tipifica a los demás puntos de la misma, entonces  $F_{i-j}$  se puede aproximar con  $F_{di-j}$  calculado para  $dA_i$  en el centro de la superficie  $i$ .

Para el cálculo de  $F_{di-j}$ , podemos utilizar el desarrollo de Nusseit; dicho desarrollo plantea que este cálculo equivale a proyectar las partes de  $A_j$  visibles desde  $dA_j$  sobre una semiesfera de radio unidad centrada con respecto a  $dA_i$ , para luego proyectar este área ortográficamente sobre la base circular unidad de la semiesfera y dividir entre el área del círculo, como se muestra en la *Figura 65*:



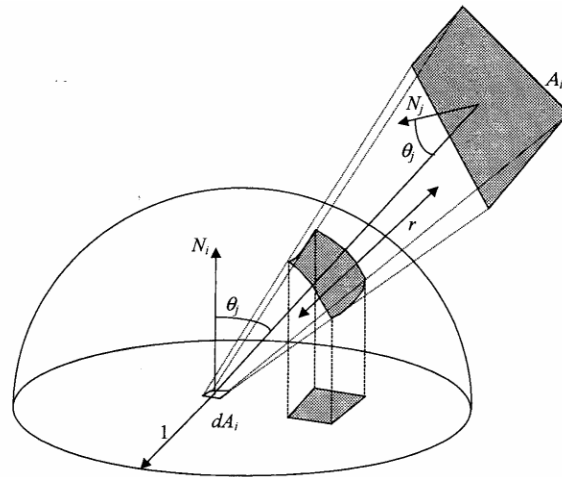


Figura 65 Proyección de un diferencial de superficie en la semiesfera

De esta manera, se puede calcular el factor de forma como la razón entre el área proyectada sobre la base de la semiesfera y el área total de la base. La proyección sobre la semiesfera unidad considera el término  $\cos(\theta_j/r_2)$  de la ecuación para calcular el factor de forma. La proyección sobre la base corresponde a una multiplicación por  $\cos(\theta_i)$  y la división entre el área del círculo unidad considera el término  $\pi$  en el denominador.

Las operaciones que hay que realizar para el cálculo de los factores de forma son complejas y muy costosas a nivel de computación, ya que hay que hacer integrales y calcular cosenos. Se puede evitar en parte este problema aproximando la semiesfera a un hemicubo. Dicho hemicubo se situaría centrado con respecto a  $dA_i$  y con la parte superior del mismo paralela a la superficie.

Cada cara de este hemicubo se divide en varias celdas cuadradas de igual tamaño. Las demás superficies se recortan con respecto al tronco del volumen de vista definido por el centro del cubo y cada una de sus cinco caras posteriores. Después, cada una de las superficies recortadas se proyecta sobre la cara apropiada del hemicubo.

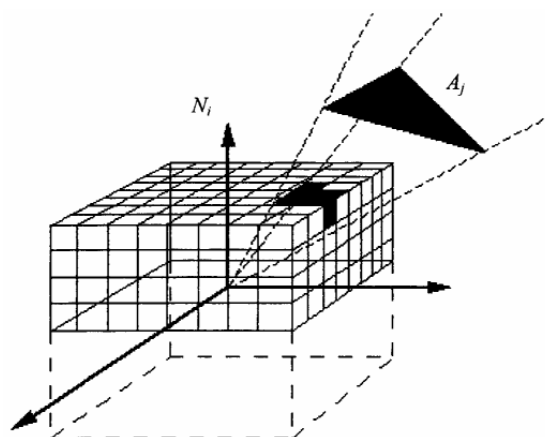


Figura 66. Aproximación de la semiesfera a un hemicubo

Cada una de las celdas del hemicubo está relacionada con un *factor de forma delta* basado en su posición. El valor de este *factor de forma delta* viene dado por la distancia que hay desde la celda al centro del hemicubo; de manera que podemos calcular el factor

de forma delta asociado a la celda operando con los valores de su posición relativa al centro del hemicubo.

Una expresión que nos da el factor de forma delta en la posición  $x$ , y dentro de un hemicubo cuyo lado es  $Res(F\delta_i)$ , puede ser la siguiente:

$$F\delta_i = \frac{1}{\pi \cdot (x^2 \cdot y^2 + 1)^2 \cdot Res}$$

Para una superficie  $j$  podemos aproximar  $F_{di-j}$  sumando los valores de los *factores de forma delta* relacionados con todas las celdas del hemicubo, y registrando en cada celda el identificador de la superficie más cercana.

### Cálculo de la Radiosidad utilizando Refinamiento Progresivo

Aunque el método de radiosidad presentado lleva a cabo un buen trabajo para la síntesis de imágenes generando presentaciones muy realistas, los requerimientos de almacenamiento son muy grandes; además del costo del tiempo de computación que también es muy elevado. De forma similar a lo que se hace en informática gráfica, vamos a utilizar el método de radiosidad por refinamiento progresivo, para disminuir los costes de almacenamiento y de computación.

Este método se basa en calcular la energía que dispara cada una de las superficies en vez de calcular la energía que recibe como se hacía antes. Con el método anterior, al evaluar la  $i$ -ésima fila del conjunto de ecuaciones (*Ecuación 15*) se obtiene un cálculo de la radiosidad de la superficie  $i$  a partir de los cálculos de las radiosidades de las otras superficies. Cada término del sumatorio de la ecuación de radiosidad (*Ecuación 14*) representa el efecto de la superficie  $j$  sobre la radiosidad de la superficie  $i$  de la siguiente forma:

$$B_i \text{ debida a } B_j = \varphi_j \cdot B_j \cdot F_{i-j} \quad \text{para toda } j$$

De esta manera, una superficie recolectaba la energía del resto del ambiente.

Por el contrario, utilizando el refinamiento progresivo, lo que hacemos es disparar al ambiente la radiosidad de una superficie. Para hacer esta modificación basta con cambiar la ecuación anterior para obtener:

$$B_j \text{ debida a } B_i = \varphi_i \cdot B_i \cdot F_{j-i} \quad \text{para toda } j$$

Utilizando este cálculo, podemos determinar la contribución de cada superficie al resto del ambiente evaluando la ecuación para cada una de las superficies. De esta manera, tenemos que conocer el factor de forma asociado a cada una de las superficies, valor que se determina con un hemicubo diferente para cada superficie. Esto supone, al igual que el método anterior, un coste considerable de tiempo y almacenamiento, pero podemos utilizar la relación de reciprocidad (propiedad que poseen los factores de forma), de la ecuación anterior para obtener otra ecuación mucho más interesante:

$$B_j \text{ debida a } B_i = \varphi_j \cdot B_j \cdot F_{i \rightarrow j} \cdot \frac{A_i}{A_j} \text{ para toda } j$$

La evaluación de esta ecuación para cada  $j$  sólo requiere los factores de forma calculados usando un hemisferio centrado con respecto a la superficie  $i$ . Esta relación es la base para el planteamiento del refinamiento progresivo para calcular la radiosidad.

Inicialmente vamos a establecer la radiosidad de cada superficie como la emisión de la misma en todas las superficies de la escena.

Luego seleccionamos la superficie con el valor de radiosidad más alto, que será el emisor de energía reflejada más potente, y calculamos la siguiente aproximación de la radiosidad para las otras superficies.

Este proceso se repite en cada paso, de manera que las fuentes de energía se distribuyen en orden de mayor a menor energía radiante y después se seleccionan otras superficies con base en la cantidad de energía que reciben del resto de las caras.

El algoritmo se repetirá hasta que se cumpla la convergencia, que se basa en el porcentaje de energía que se ha emitido ( $P_e$ ) y la energía reflejada total inicial de la escena ( $P_t$ ) expresada en dB como

$$\text{Convergencia} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_e}{P_t}\right)$$

Este algoritmo da una aproximación de la propagación real de la energía a través de los múltiples trayectos originados por reflexiones con obstáculos de una escena.

## 6.6 Resumen del diseño

Como resumen presentamos aquí las características del modelo:

1. Se utiliza una herramienta de modelado para realizar el modelo geométrico tridimensional del entorno en el que queremos aplicar el modelo de propagación.
2. Se introducen en el modelo las características de penetración y reflexión de los materiales.
3. Se ajustan los parámetros del modelo basándose en mediciones tomadas en la escena real, para que se tengan en cuenta factores ambientales no considerados en el modelo explícitamente.
4. Se utiliza el *Modelo Log-Normal Shadowing Path Loss* para el cálculo de la pérdida de señal por la propagación en el aire.
5. Se tiene en cuenta el tipo y número de obstáculos (paredes y suelos) atravesados en los que se atenuará la señal en base a las características definidas en el modelo para los materiales; produciéndose una atenuación de la señal con la suma de todas las pérdidas de penetración detectadas.
6. Se utiliza **Radiosidad por Refinamiento Progresivo** para el cálculo de la señal propagada mediante reflexiones en objetos (paredes, techos y suelos). Dependiendo de la precisión que se requiera del modelo, se pueden ajustar el tamaño de los

triángulos que forman las superficies, y la densidad de sensores en los que medir la señal.

7. Se combinan las señales recibidas directamente y mediante reflexiones para obtener la señal resultante.

# CAPÍTULO 7

## DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA EL MODELO

---

---

En el *Capítulo 6* se han descrito las principales características que definen cómo debe ser el modelo de cobertura en redes inalámbricas. Se define cómo debe comportarse en relación con los distintos fenómenos de propagación modelados.

En este capítulo se mostrará el diseño del prototipo que se ha realizado para la comprobación de la tesis. La implementación se mostrará en el *Capítulo 8*.

### 7.1 Introducción

Se llevará a cabo el análisis y diseño metodológicos utilizados para el desarrollo de la aplicación. La metodología utilizada es la conocida como Proceso Unificado de Modelado [BRJ99a], que se implementa mediante el Lenguaje Unificado de Modelado (UML) [BRJ99b]

En primer lugar se justificará la necesidad de las metodologías en el desarrollo actual de aplicaciones informáticas. Posteriormente se introducirá brevemente la metodología UML y las metodologías orientadas a objeto, para finalizar con el modelo de casos de uso, el análisis y el diseño de la aplicación.

#### ¿Por qué una metodología?

La utilidad de una metodología a la hora de desarrollar una aplicación es hoy en día imprescindible, debido a la complejidad y al tamaño de dichas aplicaciones. El uso de una metodología ayuda al programador de una forma práctica y productiva, independientemente del lenguaje final de implementación, ya que se puede utilizar el análisis de requisitos del problema y diseñar una solución uno mismo.

Con estas metodologías de análisis y desarrollo de software, se obtienen diseños más limpios y sistemas con un mejor mantenimiento, a parte de proporcionar una mejor comprensión de los requisitos. Una metodología de Ingeniería del Software es un proceso para producir software de forma organizada empleando una selección de técnicas, y convenciones de notación predefinidas.

La ventaja principal que aporta el uso de una metodología no reduce el tiempo de desarrollo, ya que este suele verse incrementado, sino que a la hora de realizar correcciones, revisiones o cambios, estos se localizarán rápido y de manera sencilla. Además, durante el desarrollo se descubren y corrige muchos problemas por lo que se evitan sorpresas en forma de problemas futuros.

La decisión de escoger un tipo de metodología u otra depende del tipo de desarrollo que se quiera realizar; hay que estudiar el objetivo para el cual se implementa el software. Para el desarrollo del presente proyecto se ha utilizado UML debido a que se va a utilizar programación orientada a objetos.

Finalmente destacar la complejidad que tiene la utilización de una metodología para proyectos distintos a los de gestión como es el caso de este proyecto, ya que es mucho más difícil y abstracto plasmar lo que queremos desarrollar.

### **Metodología Orientada a Objetos: RUP (Racional Unified Process)**

Este prototipo ha sido realizado siguiendo las etapas del Proceso Unificado de Modelado. El Proceso Unificado es el conjunto de actividades necesarias para transformar los requisitos de un usuario en un sistema software.

El Proceso Unificado está basado en componentes, lo cual quiere decir que el sistema software en construcción está formado por componentes software interconectados a través de interfaces bien definidos. El Proceso unificado utiliza el Lenguaje Unificado de Modelado para preparar todos los esquemas de un sistema software.

No obstante, los verdaderos aspectos definitorios del Proceso Unificado se resumen en 3 frases clave: dirigidos por Casos de Uso, centrado en la arquitectura, e iterativo e incremental.

### **El Proceso Unificado de Modelado está dirigido por Casos de Uso.**

Un sistema software ve la luz para dar servicio a un conjunto de usuarios. Por tanto, para construir un sistema con éxito debemos conocer lo que los futuros usuarios necesitan y desean.

El término *usuario* no sólo hace referencia a usuarios humanos si no también a otros sistemas. En este sentido, el término usuario representa a alguien o a algo que interactúa con el sistema que estamos desarrollando. Esta interacción se representa mediante *Casos de Uso*.

Los casos de uso representan los requisitos funcionales; y todos los casos de uso representan el modelado de casos de usos; el cual define la funcionalidad total del sistema. Puede decirse que una especificación funcional contesta a la pregunta *¿qué debe hacer el sistema?*. La estrategia de casos de uso puede describirse añadiendo 3 palabras al final de la pregunta *¿...para cada usuario?*. Estas 3 palabras albergan una implicación importante, nos fuerzan a pensar en términos de importancia para el usuario y no solo en términos de funciones que sería bueno tener.

Sin embargo los casos de uso no son sólo una herramienta para especificar los requisitos de un sistema, también guían su diseño, implementación y prueba; esto es, guían el proceso de desarrollo dirigido por casos de uso.

Aunque es cierto que los casos de uso guían el proceso, no se desarrollan aisladamente, si no a la vez que la arquitectura del sistema, es decir, los casos de uso guían la arquitectura del sistema y esta influye en la selección de los casos de uso.

### **El Proceso Unificado de Modelado está centrado en la arquitectura.**

La arquitectura de un sistema software se describe mediante diferentes vistas del sistema en construcción. El concepto arquitectura software incluye los aspectos estáticos y dinámicos más significativos del sistema.

La arquitectura surge de las necesidades de la empresa y se refleja en los casos de uso. Sin embargo, también se ve influida por otros factores como la plataforma sobre la que tiene que funcionar el software (arquitectura hardware, sistema operativo, sistema de gestión de BBDD, protocolos de comunicación,...), los bloques reutilizados de que se dispone (por ejemplo, un marco de trabajo para interfaces gráficos de usuario), consideraciones de implantación, y requisitos no funcionales (por ejemplo, rendimiento y fiabilidad). La arquitectura es una parte del diseño completo con las características más importantes resaltadas.

*¿Cómo se relacionan los casos de uso y la arquitectura?*. Cada producto tiene tanto una función como una forma; ninguna es suficiente por si misma. En esta situación, la función corresponde a los casos de uso y la forma a la arquitectura. Debe haber interacción entre casos de uso y arquitectura, es un problema de “el huevo o la gallina”; por un lado los casos de uso deben encajar en la arquitectura cuando se llevan a cabo; por otro lado, la arquitectura debe permitir el desarrollo de todos los casos de uso requeridos ahora y en el futuro. En realidad, tanto la arquitectura como los casos de uso deben evolucionar en paralelo.

De manera resumida podemos decir que el arquitecto:

1. Crea un esquema borrador de la arquitectura comenzando por la parte que no es específica de los casos de uso.
2. El arquitecto trabaja con un sólo conjunto de los casos de uso especificados, con aquellos que representan las funciones clave del sistema en desarrollo. Cada caso de uso seleccionado se especifica en detalle y se realiza en términos de subsistemas, clases y componentes.
3. A medida que los casos de uso se especifican y maduran se descubre más la arquitectura.

### **El Proceso Unificado de Modelado es iterativo e incremental.**

El desarrollo de un producto software supone un gran esfuerzo que puede durar bastante tiempo. Es práctico dividir el trabajo en partes más pequeñas o macroyectos. Cada macroyecto es una iteración que da como resultado un incremento. En cada iteración los desarrolladores identifican y especifican los casos de uso relevantes, crean un diseño utilizando la arquitectura seleccionada como guía, implementan un diseño

mediante componentes, y verifican que los componentes satisfacen los casos de uso. Si una iteración cumple con sus objetivos el desarrollo continúa en la siguiente iteración. Cuando una iteración no los cumple, los desarrolladores deben revisar sus decisiones y probar con un nuevo enfoque.

## **El Producto**

Cada versión del producto consta de código fuente incluido en componentes que pueden compilarse, manuales y otros productos asociados. El producto terminado incluye:

- Un Modelo de Casos de Uso, con todos los casos de uso y su relación con los usuarios.
- Un Modelo de Análisis, con el propósito de refinar los casos de uso con mayor detalle
- Un Modelo de Diseño, que define la estructura estática del sistema en forma de subsistemas, clases e interfaces y los Casos de Uso reflejados como colaboraciones entre ellos.
- Un Modelo de Implementación, que incluye componentes (que representan código fuente) y las correspondencias de las clases con los componentes.
- Un modelo de despliegue, que define los nodos físicos (ordenadores) y la correspondencia de los componentes con esos nodos.
- Un Modelo de Prueba, que describe los casos de prueba que verifican los casos de uso.
- Una representación de la arquitectura.



## **7.2 Análisis: Modelo de requisitos**

### **7.2.1 Especificación textual**

Se trata de diseñar un sistema que utilice el modelo de propagación de ondas basado en radiosidad por refinamiento progresivo para calcular y “visualizar” los límites de la cobertura y la calidad que tendrían conexiones en redes inalámbricas.

El sistema que se pretende desarrollar tendrá como usuarios a técnicos, diseñadores o administradores de redes inalámbricas.

La instalación de una WLAN es una tarea compleja debido a la imposibilidad de “visualizar” el medio de transmisión inalámbrico. Factores como los materiales de construcción del edificio así como posibles fuentes silenciosas de interferencias inciden sobre las ondas de radio de una manera difícilmente predecible.

Para tener bajo control todas estas incertidumbres es necesario realizar una serie de medidas de cobertura de radiofrecuencia a través de un estudio sobre el terreno. La complejidad de este proceso podría verse reducida mediante una herramienta de simulación que permita, a partir de un modelo geométrico tridimensional de la estructura de un edificio, tomado como entrada, obtener una visión gráfica de los niveles de cobertura obtenidos en base la instalación de una serie de Puntos de Acceso.

### **7.2.2 Especificación de requisitos**

#### **1. Requisitos funcionales**

##### – Gestión del modelo 3D

##### 1..1. Cargar un modelo 3D

El técnico importa el modelo en el sistema para utilizar sobre él las herramientas de planificación y simulación disponibles. El modelo estará definido en un fichero con formato ASE. Cada modelo será considerado como una planta dentro de un mismo edificio. Las plantas se cargarán sucesivamente desde el nivel 0 hacia arriba.

##### 1..2. Guardar modelo

El técnico podrá guardar en cualquier momento todos los resultados obtenidos hasta ese momento, así como la configuración personalizada del modelo.

##### 1..3. Cerrar modelo 3D abierto

El escenario es eliminado del sistema el cual quedará disponible para tratar un nuevo modelo.

##### 1..4. Visualizar modelo 3D

Se podrán definir vistas del escenario que permitan ver con claridad la estructura básica del edificio en 3D.

– Planificación de la instalación

1..1. Instalación de Punto de Acceso

El técnico podrá instalar un Punto de Acceso en el modelo ubicando en cualquier posición dentro del espacio 3D. El Punto de Acceso quedará definido por un nombre identificativo. Una vez instalado, el Punto de Acceso quedará operativo y en disposición de emitir señal una vez que el técnico lo considere oportuno.

1..2. Traslado de Punto de Acceso

El técnico podrá trasladar un Punto de Acceso operativo instalado en el modelo a una nueva ubicación en cualquier posición dentro del espacio 3D. Una vez realizado el traslado, el Punto de Acceso quedará en disposición de emitir señal una vez el técnico lo considere oportuno.

1..3. Desmontaje de Punto de Acceso

El técnico podrá desmontar un Punto de Acceso operativo de modo que éste es eliminado del modelo.

1..4. Configuración de Punto de Acceso

El técnico podrá configurar parámetros básicos de funcionamiento de un Punto de Acceso como son: Potencia de transmisión (expresada en dBm), Orientación y Patrón de Radiación (anchura de haz frontal y posterior en sentido horizontal y vertical).

– Simulación predictiva

1..1. Simulación de propagación usando los modelos: camino directo, multiwall, linear path attenuation, dual slope y Keenan-Motley.

El técnico podrá iniciar la simulación mediante la emisión de señal de todos los Puntos de Acceso con arreglo a su configuración. El resultado debe ser la visualización en 3D de los niveles de cobertura conseguidos con la instalación propuesta representado los mismos mediante un sistema de colores. Los datos de cobertura obtenidos con los diferentes modelos de propagación se deben almacenar para su posterior utilización.

Será posible definir la precisión con que se realiza la estimación mediante la definición del área o volumen máximo de las particiones del espacio total tenidas en cuenta para las mediciones. Asimismo deberá tenerse en cuenta la limitación de un máximo de 3 celdas con zonas solapadas y/o adyacentes sin causar interferencias entre ellas.

1..2. Simulación multitrayecto

El técnico podrá iniciar la simulación de multitrayectos debido a reflexiones provocadas por colisiones con obstáculos en el trayecto entre emisor y receptor. En este caso, se utiliza el modelo basado en radiosidad por refinamiento progresivo. El resultado debe ser la visualización en 3D de los niveles de señal rebotada en cada zona del modelo mostrada con un código de colores. Los datos de cobertura obtenidos con este modelo de propagación se deben almacenar para su posterior utilización.

### 1..3. Comparación de resultados

El técnico podrá introducir medidas obtenidas manualmente, y posteriormente comparar los resultados con los obtenidos por medio de las distintas simulaciones.

### 1..4. Preferencias

El técnico podrá configurar todos los parámetros que intervienen en el proceso de propagación para obtener la simulación que más se ajuste a las condiciones del entorno real.

Se podrán configurar todas las variables que intervienen en los distintos modelos de propagación, los materiales del modelo, así como la red sensorial.

## – Resultados

### 1..1. Visualización

La visualización de la instalación y de los resultados se realizará sobre el modelo 3D utilizando un código de colores para identificar rango de potencia de la señal recibida en cada área. El proceso de visualización será automático una vez concluidos los cálculos de medición efectuados en las distintas simulaciones.

### 1..2. Exportar

El técnico podrá exportar los resultados obtenidos de la simulación en distintos formatos: bmp, wrl y xls con los valores de cobertura en los sensores que se especifiquen.

## **2. Requisitos generales**

### – Formato del modelo 3D

El modelo 3D se importará de un fichero en formato ASE (ASCII Scene Export) de 3Dstudio MAX.

### – Unidades de medida

Se utilizarán dBm, dB, mW y metros.

## **7.2.3 Casos de Uso y Escenarios**

### **7.2.3.1 Actores**

- **Técnico**

Usuario del prototipo cuyo objetivo es la instalación de una WLAN en el edificio que se ha modelado, para lo cual se ayuda de esta herramienta de simulación. Su misión consiste en planificar la ubicación y configuración básica de los puntos de acceso 802.11b de modo que se consiga una adecuada cobertura y rendimiento de la red con arreglo a los requerimientos marcados por su cliente.

## 7.2.4 Modelo de Casos de Uso

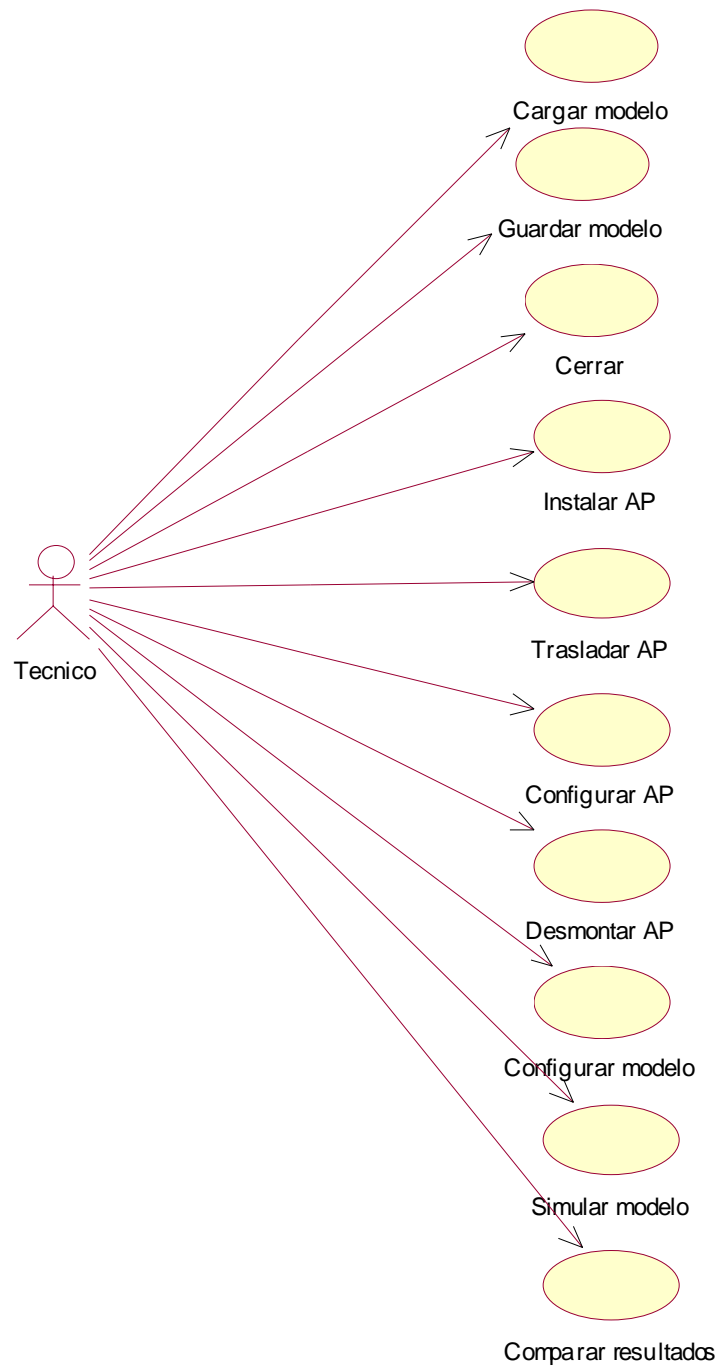


Figura 67. Diagrama de Casos de Uso

### **7.2.4.1 Caso de Uso 1: Cargar modelo**

Definición: El técnico carga el entorno a modelar en la herramienta

Actores: Técnico

Prioridad: Alta

Urgencia: Inmediata

Importancia: Vital

Requerimientos implementados: Gestión del Modelo 3D

Notas: Cada modelo representa una planta de un edificio. El primer modelo cargado será la primera planta, el segundo la planta segunda y así sucesivamente. La numeración de plantas comienza por la número 0.

#### ***7.2.4.1.1 Escenario 1.1: Cargar modelo***

Precondiciones: N° de plantas < Límite n° plantas

Poscondiciones: N° de plantas > 0.

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: El modelo de planta queda almacenado en memoria

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona el fichero del modelo.
- El sistema comprueba si el formato es correcto.
- El sistema lee los materiales existentes
- El sistema lee los vértices definidos en el modelo
- El sistema compone las caras o polígonos
- El sistema compone los objetos y les asocia un material.
- Se calcula la altura de la planta
- El modelo se visualiza en pantalla

#### ***7.2.4.1.2 Escenario 1.2: Cargar simulación***

Precondiciones: Ninguna

Poscondiciones: N° de plantas > 0.

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Visualización de la simulación con las escenas correspondientes.

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona el fichero de la simulación.
- El sistema comprueba si el formato es correcto.
- El sistema lee la información del fichero.
- El sistema muestra las escenas que se han cargado y los resultados de la simulación guardada.

### **7.2.4.2 Caso de Uso 2: Guardar modelo**

Definición: El técnico guarda el modelo y/o los datos simulados

Actores: Técnico

Prioridad: Alta

Urgencia: Inmediata

Importancia: Normal.

Requerimientos implementados: Gestión del Modelo 3D

Notas: Se puede guardar tanto la simulación en sí con todos los resultados y su configuración como también se puede exportar o guardar los datos obtenidos de la simulación.

#### **7.2.4.2.1 Escenario 2.1: Guardar la simulación.**

Precondiciones: N° plantas > 0.

Poscondiciones: N° plantas > 0.

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Creación de un fichero de simulación.

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona el fichero en el que se va a guardar.
- Se guarda la información de las escenas.
- Se guarda la información de los puntos de acceso.

- Se guarda la información de lo simulado hasta el momento.

### **7.2.4.3 Caso de Uso 3: Cerrar**

Definición: El técnico cierra una escena

Actores: Técnico

Prioridad: Alta

Urgencia: Inmediata

Importancia: Vital

Requerimientos implementados: Gestión del Modelo 3D

Notas: Al cerrar una escena se elimina del modelo y produce una reasignación de las demás escenas.

#### ***7.2.4.3.1 Escenario 3.1: Cerrar escena***

Precondiciones: N° de plantas > 0.

Poscondiciones: Ninguna.

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Escena eliminada del modelo.

Detalle de operaciones:

- La escena seleccionada se elimina del modelo.
- Si hay más escenas se hace una reasignación de ellas.
- Si no hay más escenas se eliminan los Aps y se deja el modelo en el estado inicial.
- Se cierra la pantalla de visualización de la escena.

#### ***7.2.4.3.2 Escenario 3.2: Cerrar modelo***

Precondiciones: N° de plantas > 0.

Poscondiciones: N° de plantas=0, N° access points=0

Iniciado por: Técnico.



Finalizado por: Fin de la aplicación o estado inicial

Detalle de operaciones:

- Se eliminan todas las escenas y los access point
- Se cierran todas las pantallas de visualización de las escenas.

#### **7.2.4.4 Caso de Uso 4: Instalar AP**

Definición: El técnico añade a la instalación un nuevo punto de acceso

Actores: Técnico.

Prioridad: Alta

Urgencia: Inmediata

Importancia: Vital

Requerimientos implementados: Planificación de la instalación

Notas: La instalación de un nuevo punto de acceso supone el reseteo de las medidas de simulación efectuadas hasta ese momento.

##### **7.2.4.4.1 Escenario 4.1: Instalar Punto de Acceso**

Precondiciones: N° de plantas > 0.

Poscondiciones: N° de Access Point > 0.

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Access Point instalado en el modelo

Detalle de operaciones:

- El técnico introduce datos de identificación y ubicación del Access Point
- El sistema comprueba que el identificador asignado no existe
- El Access Point se instala en el modelo pudiendo visualizarse.

#### **7.2.4.5 Caso de Uso 5: Trasladar AP**

Definición: El técnico varía la ubicación de un AP ya instalado

Actores: Técnico.

Prioridad: Alta

Urgencia: Inmediata

Importancia: Vital

Requerimientos implementados: Planificación de la instalación

Notas: El traslado del punto de acceso supone el reseteo de las medidas de simulación efectuadas hasta ese momento.

#### ***7.2.4.5.1 Escenario 5.1: Traslado Punto de Acceso***

Precondiciones: N° de Access Point > 0.

Poscondiciones: N° de Access Point > 0.

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Access Point instalado en nueva posición

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona Access Point existente en la instalación
- El técnico introduce datos de nueva ubicación del Access Point
- El Access Point se reinstala en el modelo pudiendo visualizarse.

#### **7.2.4.6 Caso de Uso 6: Configurar AP**

Definición: El técnico configura los parámetros básicos de un AP ya instalado

Actores: Técnico.

Prioridad: Alta

Urgencia: Inmediata

Importancia: Vital

Requerimientos implementados: Planificación e la instalación

Notas: La reconfiguración de un punto de acceso supone el reseteo de las medidas de simulación efectuadas hasta ese momento.

#### **7.2.4.6.1 Escenario 6.1: Configurar Punto de Acceso**

Precondiciones: N° Access Point > 0.

Poscondiciones: N° Access Point > 0.

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Access Point con nueva configuración activa

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona Access Point existente en la instalación y cambia su configuración.
- El Access Point queda configurado con los nuevos valores.

#### **7.2.4.7 Caso de Uso 7: Desmontar AP**

Definición: El técnico elimina un AP ya instalado

Actores: Técnico.

Prioridad: Alta

Urgencia: Inmediata

Importancia: Vital

Requerimientos implementados: Planificación de la instalación

Notas: La eliminación de un punto de acceso supone el reseteo de las medidas de simulación efectuadas hasta ese momento.

#### **7.2.4.7.1 Escenario 7.1: Desmontar Punto de Acceso**

Precondiciones: N° Access Point > 0.

Poscondiciones: Ninguna.

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Access Point eliminado del modelo

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona Access Point existente en la instalación
- El Access Point se elimina del modelo.

#### **7.2.4.8 Caso de Uso 8: Configurar modelo**

Definición: El técnico configura los parámetros generales propagación, materiales, radiosidad y sensores.

Actores: Técnico

Prioridad: Alta

Urgencia: Inmediata

Importancia: Vital

Requisitos implementados: Predicción de cobertura

Notas: La reconfiguración supone el reseteo de las medidas de simulación efectuadas hasta ese momento.

##### ***7.2.4.8.1 Escenario 8.1: Modificación de preferencias de materiales***

Precondiciones: N° plantas > 0.

Poscondiciones:

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Cambios en la configuración de los materiales.

Detalle de operaciones:

- El técnico solicita modificar las preferencias de materiales
- El técnico introduce nuevo datos de los parámetros configurables
- El sistema se actualiza con la nueva información

##### ***7.2.4.8.2 Escenario 8.2: Modificación de preferencias de propagación***

Precondiciones:

Poscondiciones:

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Cambios en las variables de propagación.

Detalle de operaciones:

- El técnico solicita modificar las preferencias de propagación de los modelos empíricos (Prop. Directa, MultiWall, Linear Path, Dual Slope, Keenan-Motley).
- El técnico introduce nuevo datos de los parámetros configurables
- El sistema se actualiza con la nueva información

#### ***7.2.4.8.3 Escenario 8.3: Modificación de preferencias sobre el algoritmo de radiosidad***

Precondiciones:

Poscondiciones:

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Cambios de la configuración del algoritmo de radiosidad

Detalle de operaciones:

- El técnico solicita modificar las preferencias del algoritmo de radiosidad.
- El técnico introduce los nuevos valores.
- El sistema se actualiza con la nueva información.

#### ***7.2.4.8.4 Escenario 8.4: Modificación de preferencias sobre los sensores***

Precondiciones:

Poscondiciones:

Iniciado por: Técnico.

Finalizado por: Cambios en los valores de la red sensorial.

Detalle de operaciones:

- El técnico solicita modificar las preferencias sobre los sensores.
- El técnico introduce los nuevos datos.
- El sistema se actualiza con la nueva información

#### **7.2.4.9 Caso de Uso 9: Simular modelo**

Definición: El técnico dispara la herramienta de predicción de cobertura, utilizando la simulación por algún modelo, con arreglo a la instalación planificada.

Actores: Técnico

Prioridad: Alta

Urgencia: Inmediata

Importancia: Vital

Requisitos implementados: Predicción de cobertura

Notas: Después de la simulación se mostrará el resultado de la simulación en cada escena.

##### ***7.2.4.9.1 Escenario 9.1: Predicción de propagación directa***

Precondiciones: N° de Access Point > 0.

Poscondiciones: Visualización de los resultados de la propagación directa.

Iniciado por: Usuario.

Finalizado por: Visualización del resultado.

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona predicción de propagación directa.
- El sistema lleva a cabo los cálculos de cobertura.
- El sistema muestra el resultado.

##### ***7.2.4.9.2 Escenario 9.2: Predicción multitrayecto***

Precondiciones: N° de Access Point > 0.

Poscondiciones: Visualización de los resultados de la propagación multitrayecto.

Iniciado por: Usuario.

Finalizado por: Visualización del resultado.

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona predicción de propagación multitrayecto.
- El sistema lleva a cabo los cálculos de nivel de señal en cada punto.
- El sistema muestra el resultado.

#### **7.2.4.9.3 Escenario 9.3: Predicción de propagación conjunta**

Precondiciones: N° de Access Point > 0.

Poscondiciones: Visualización de los resultados de la propagación conjunta.

Iniciado por: Usuario.

Finalizado por: Visualización del resultado.

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona predicción de propagación conjunta.
- El sistema simula propagación directa.
- El sistema simula propagación multitrayecto.
- El sistema combina los resultados.
- El sistema muestra el resultado.

#### **7.2.4.9.4 Escenario 9.4: Predicción de propagación multi-wall**

Precondiciones: N° de Access Point > 0.

Poscondiciones: Visualización de los resultados de la propagación multi-wall.

Iniciado por: Usuario.

Finalizado por: Visualización del resultado.

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona predicción de propagación multi-wall.
- El sistema lleva a cabo los cálculos de cobertura.
- El sistema muestra el resultado.

#### **7.2.4.9.5 Escenario 9.5: Predicción de propagación linear path**

Precondiciones: N° de Access Point > 0.

Poscondiciones: Visualización de los resultados de la propagación linear path.

Iniciado por: Usuario.

Finalizado por: Visualización del resultado.

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona predicción de propagación linear path.
- El sistema lleva a cabo los cálculos de cobertura.
- El sistema muestra el resultado.

#### ***7.2.4.9.6 Escenario 9.6: Predicción de propagación dual slope***

Precondiciones: N° de Access Point > 0.

Poscondiciones: Visualización de los resultados de la propagación dual slope.

Iniciado por: Usuario.

Finalizado por: Visualización del resultado.

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona predicción de propagación dual slope.
- El sistema lleva a cabo los cálculos de cobertura.
- El sistema muestra el resultado.

#### ***7.2.4.9.7 Escenario 9.7: Predicción de propagación Keenan-Motley***

Precondiciones: N° de Access Point > 0.

Poscondiciones: Visualización de los resultados de la propagación Keenan-Motley.

Iniciado por: Usuario.

Finalizado por: Visualización del resultado.

Detalle de operaciones:

- El técnico selecciona predicción de propagación Keenan-Motley.
- El sistema lleva a cabo los cálculos de cobertura.
- El sistema muestra el resultado.



#### **7.2.4.10 Caso de Uso 10: Comparar resultados**

Definición: El técnico introduce los puntos en los que desea comparar los resultados y el valor medido manualmente en ese punto. Después compara los resultados pudiendo guardar los resultados en formato html o en xls.

Actores: Técnico

Prioridad: Alta

Urgencia: Inmediata

Importancia: Vital

Requisitos implementados: Predicción de cobertura

##### ***7.2.4.10.1 Escenario 10.1: Comparar resultados***

Precondiciones: Hay algún modelo de propagación simulado.

Poscondiciones: Se muestran los puntos introducidos manualmente con los valores correspondientes.

Iniciado por: Usuario.

Finalizado por: Visualización del resultado y archivo creado.

Detalle de operaciones:

- El técnico introduce los puntos y los valores.
- El técnico elige comparar los resultados.
- El sistema muestra el resultado y guarda el archivo.

## 7.3 Diseño Preliminar

### 7.3.1 Memoria del Diseño Preliminar

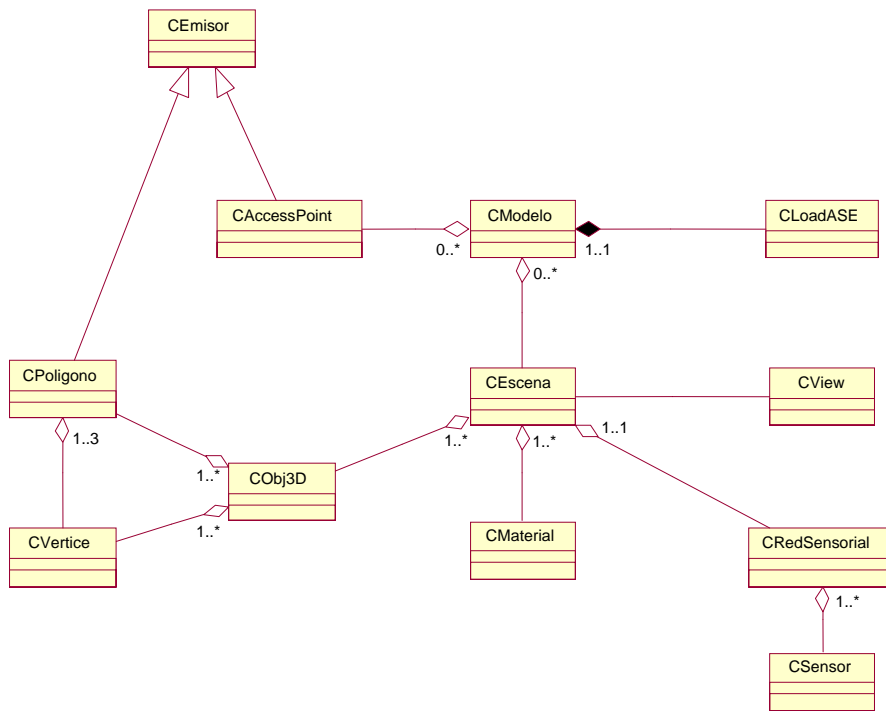
El objetivo del análisis ha sido la obtención de un modelo de funcionamiento del sistema correcto, completo, consistente y verificable. El modelo se expresa en términos de objetos y relaciones, el control dinámico de flujo y las transformaciones funcionales. Se han estructurado y formalizado los requisitos planteados en el capítulo anterior, obteniéndose un modelo de objetos de análisis representado en un diagrama de clases, y un modelo dinámico a través de diagramas de secuencia.

Los pasos seguidos han sido:

- Construcción de un modelo de objetos preliminar, cuyas fases son:
  - Identificación de las clases de objetos: *Cmodelo*, *CLoadASE*, *Cescena*, *Cmaterial*, *Cobj3D*, *Cpoligono*, *Cvertice*, *CaccessPoint*, *CredSensorial*, *Csensor* y *Cview*.
  - Agregación de asociaciones entre clases, identificándose:
    - *Cmodelo-Cescena*: asociación de cardinalidad 1:n calificada como *edificio-planta*.
    - *Cmodelo-CaccessPoint*: asociación de cardinalidad 1:n calificada como *instalación*.
    - *Cmodelo-CLoadASE* asociación de cardinalidad 1:1 que define la relación entre el modelo y el cargador de escenas ASE.
    - *Cescena-CredSensorial*: asociación de cardinalidad 1:1 que define la relación entre una escena y su red de sensores de medición.
    - *CredSensorial-Csensor*: asociación de cardinalidad 1:n para estructura la composición de una red de sensores de medición.
    - *Cescena-Cmaterial*: asociación de cardinalidad 1:n para el registro de los materiales de una escena.
    - *Cescena-Cobj3D*: asociación de cardinalidad 1:n, para el control de los objetos que componen una escena.
    - *Cobj3D-Cpoligono*: asociación de cardinalidad 1:n, para el control de las caras que componen un objeto 3D.
    - *Cobj3D-Cvertice*: asociación de cardinalidad 1:n, para el control de los vértices que componen un objeto 3D.
    - *Cpoligono-Cvertice*: asociación de cardinalidad 1:3, para el control de los vértices que componen una cara triangular.
    - *Cescena-Cview*: asociación de cardinalidad 1:1, que asocia cada escena con una ventana de visualización de resultados.
  - Agregar atributos a objetos.
  - Organizar y simplificar las clases de objetos usando herencia.
  - Creación de clase *Cemisor* como generalización de *CaccessPoint* y *Cpoligono*, debido a que ambos objetos tienen la propiedad de radiar señales en un momento dado, *CaccessPoint* de manera intrínseca y *Cpoligono* en las reflexiones para la simulación multitrayecto.

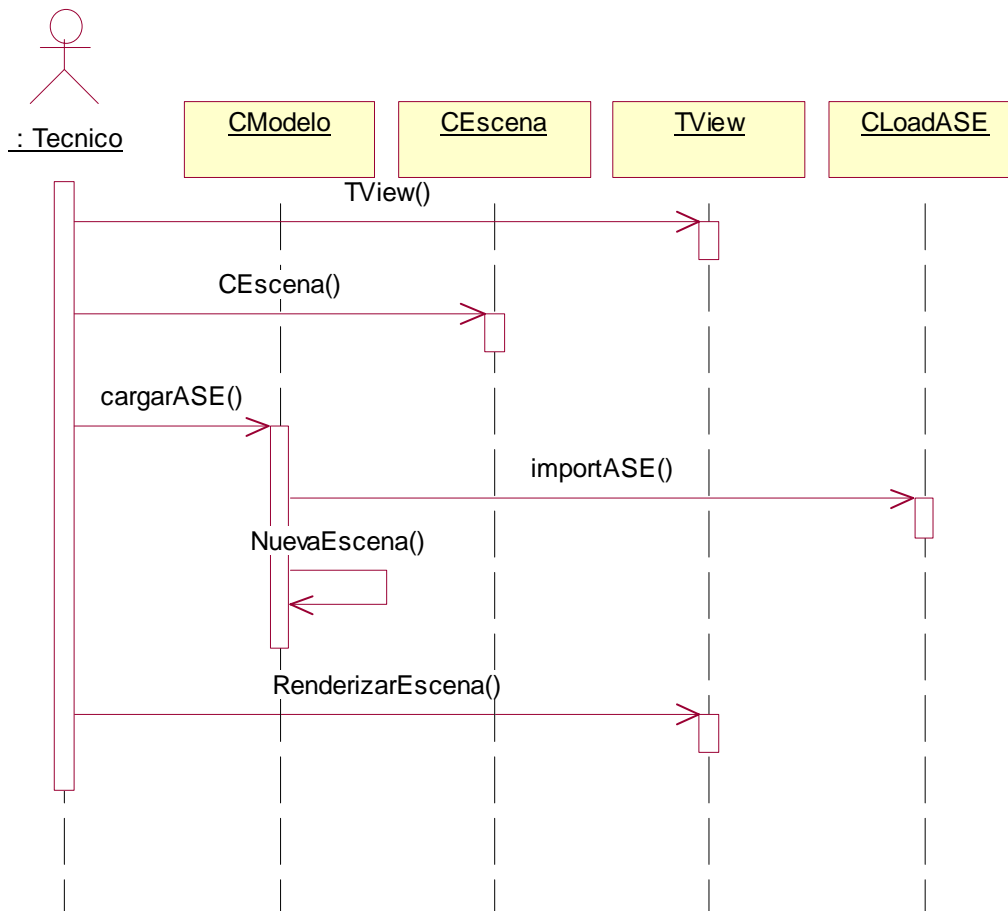
- Probar las rutas de acceso usando escenarios e iterar los pasos anteriores según sea necesario.
  - Diccionario de datos que contenga descripciones de clases, atributos y asociaciones.
- Verificación, iteración y refinamiento de los modelos hasta completar el diseño.

### 7.3.2 Diagrama de Clases

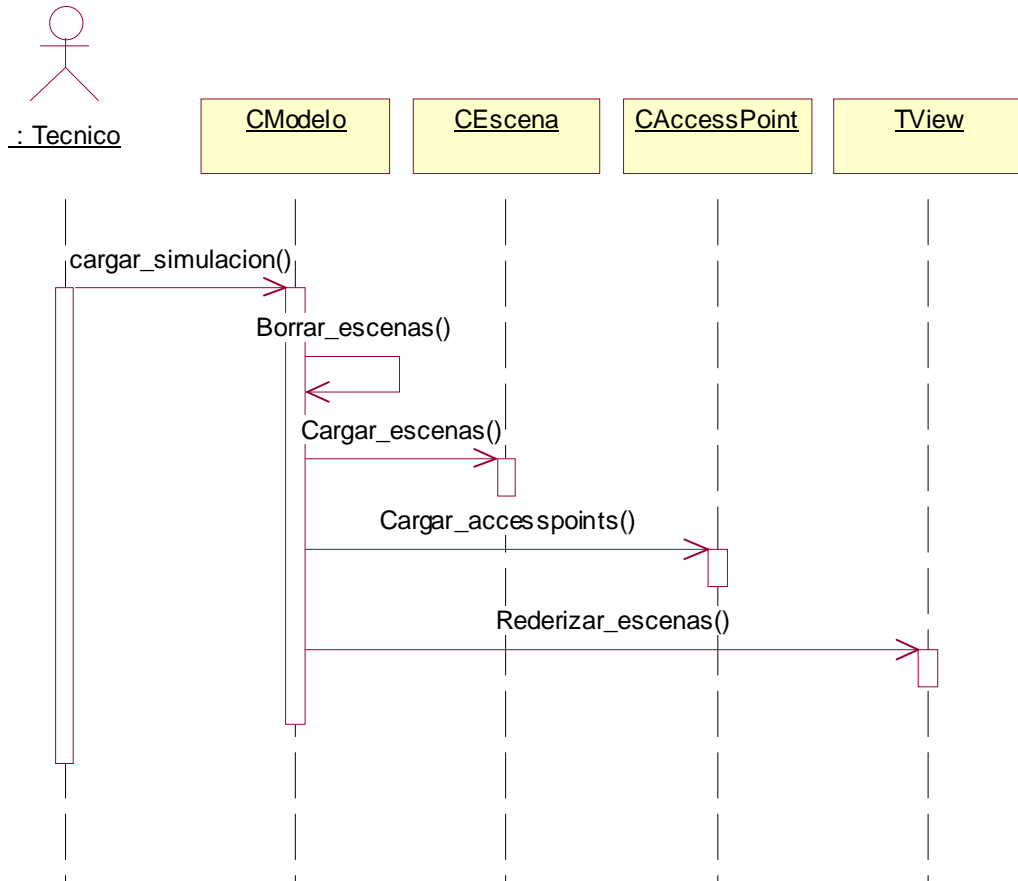


### 7.3.3 Diagramas de Secuencia

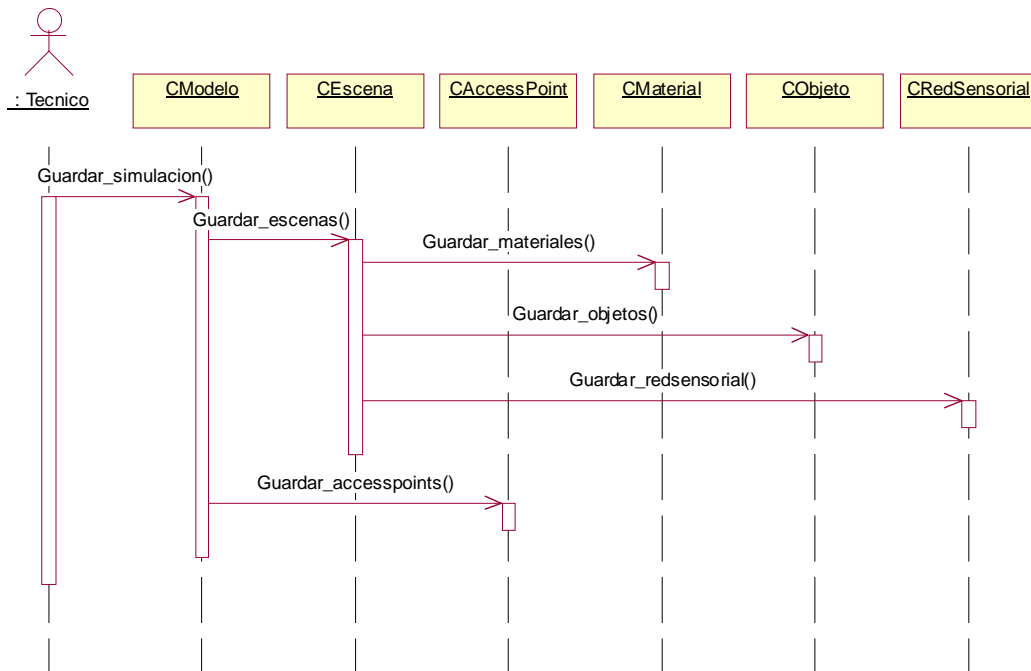
#### 7.3.3.1 Escenario 1.1: Cargar Modelo



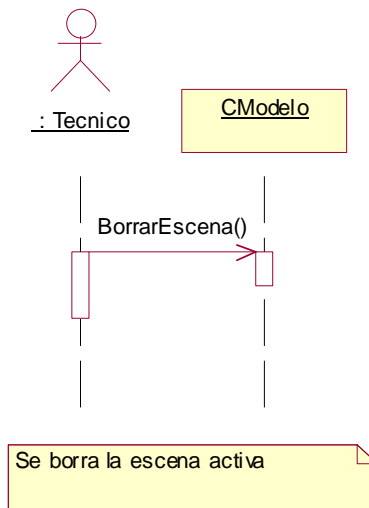
### 7.3.3.2 Escenario 1.2: Cargar Simulación



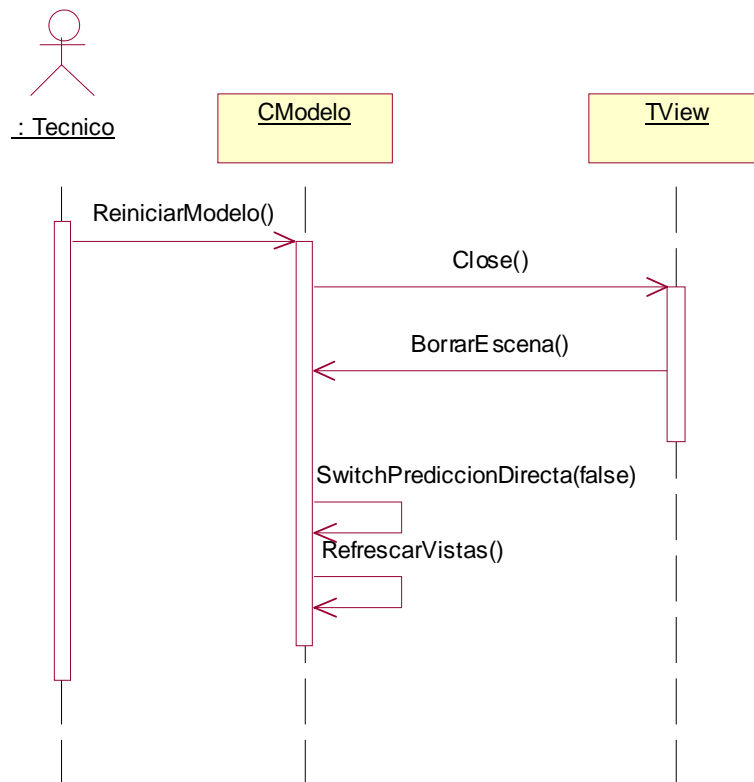
### 7.3.3.3 Escenario 2.1: Guardar Simulación



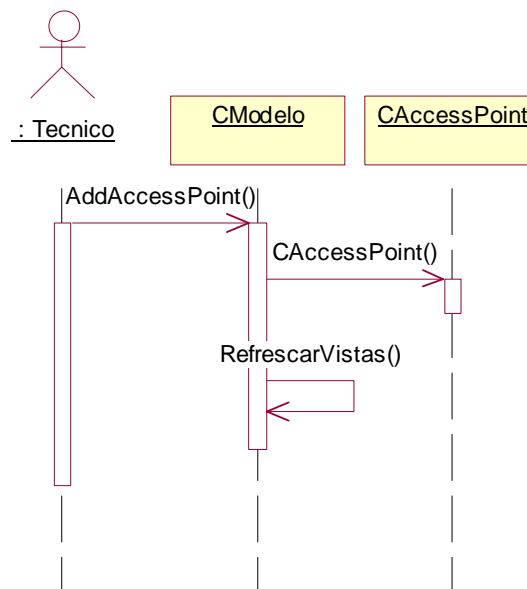
### 7.3.3.4 Escenario 3.1: Cerrar Escena



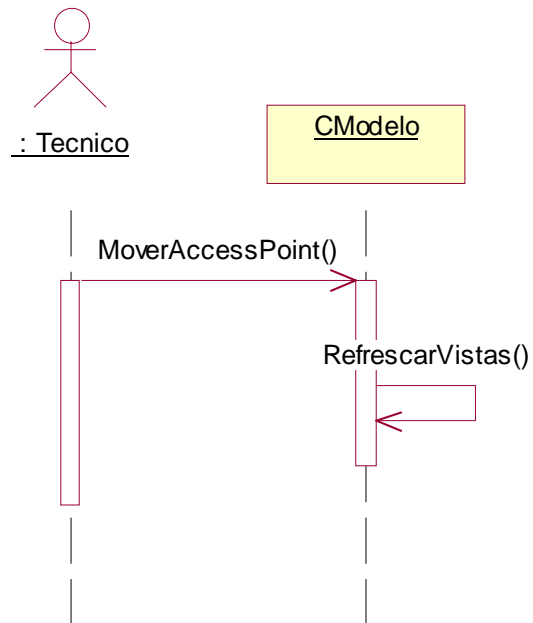
### 7.3.3.5 Escenario 3.2: Cerrar Modelo



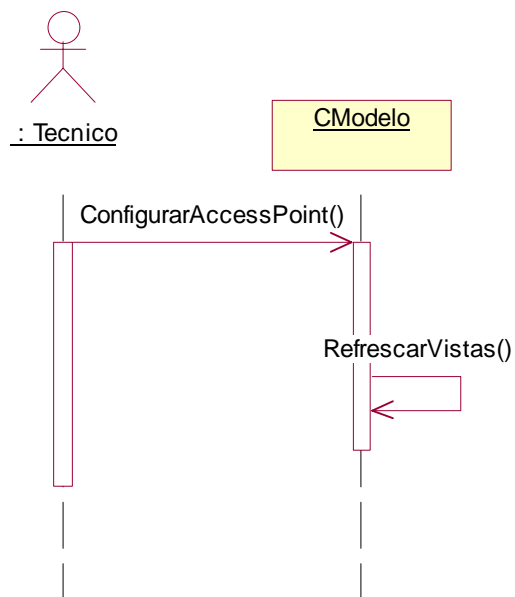
### 7.3.3.6 Escenario 4.1: Instalar Punto de Acceso



### 7.3.3.7 Escenario 5.1: Trasladar Punto de Acceso

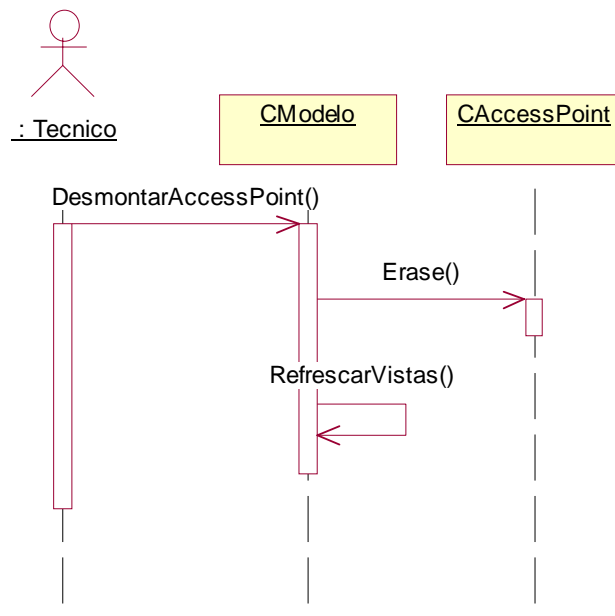


### 7.3.3.8 Escenario 6.1 Configurar Punto de Acceso

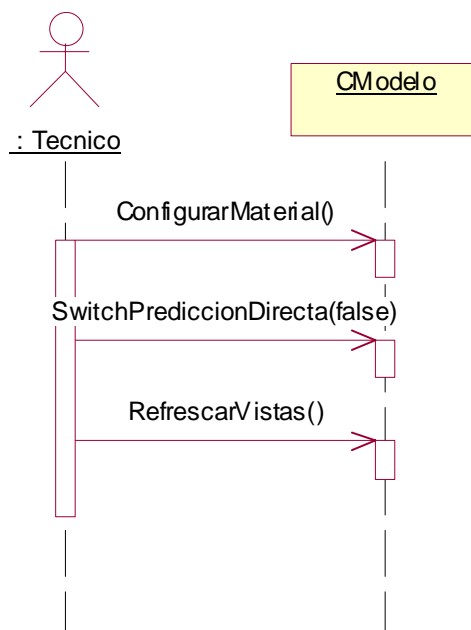




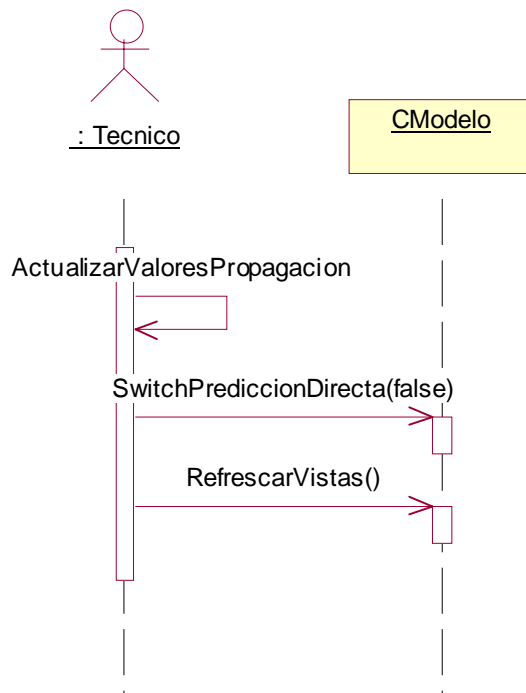
### 7.3.3.9 Escenario 7.1: Desmontar Punto de Acceso



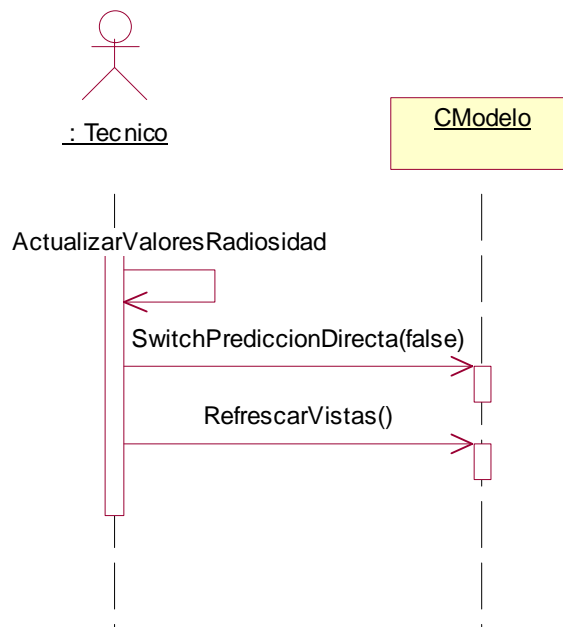
### 7.3.3.10 Escenario 8.1: Modificación de preferencias de materiales



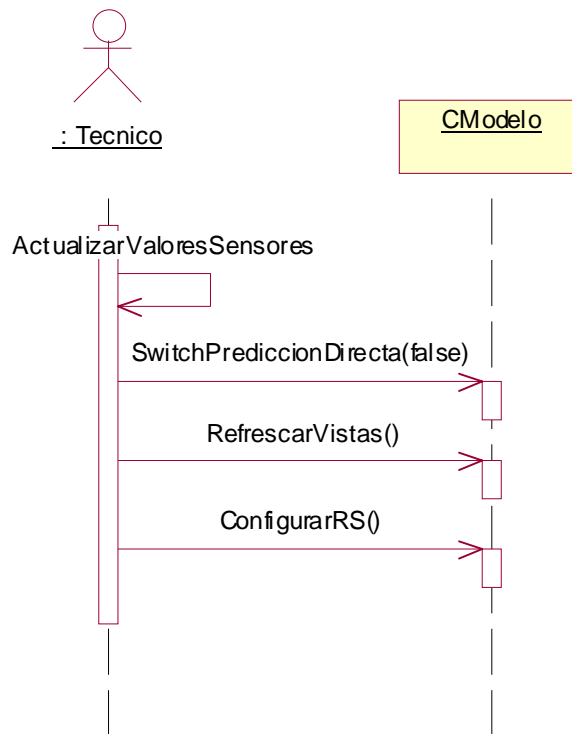
### 7.3.3.11 Escenario 8.2: Modificación de preferencias de propagación



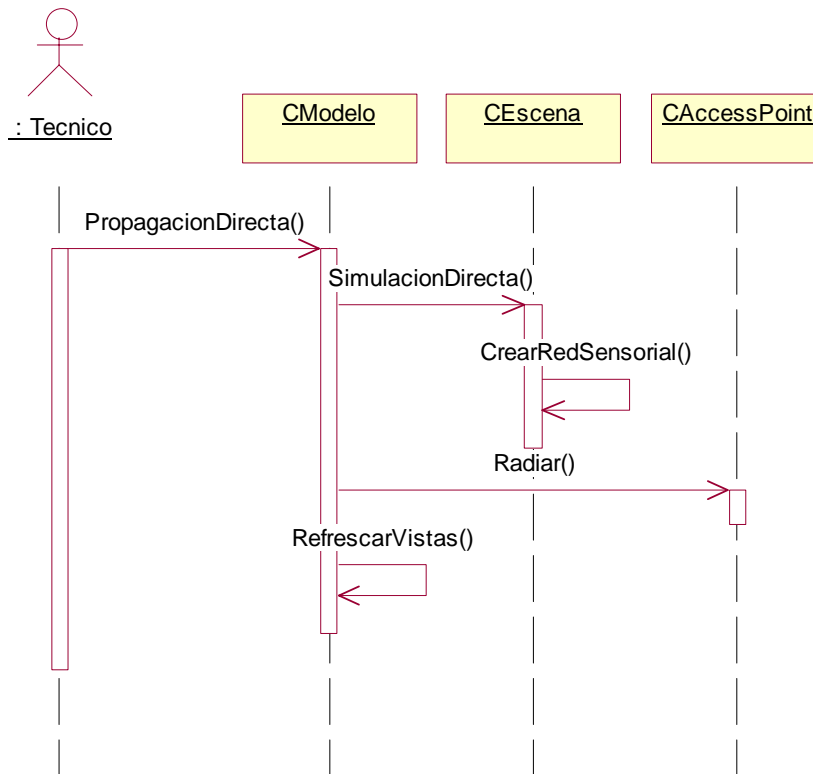
### 7.3.3.12 Escenario 8.3: Modificación de preferencias algoritmo de radiosidad



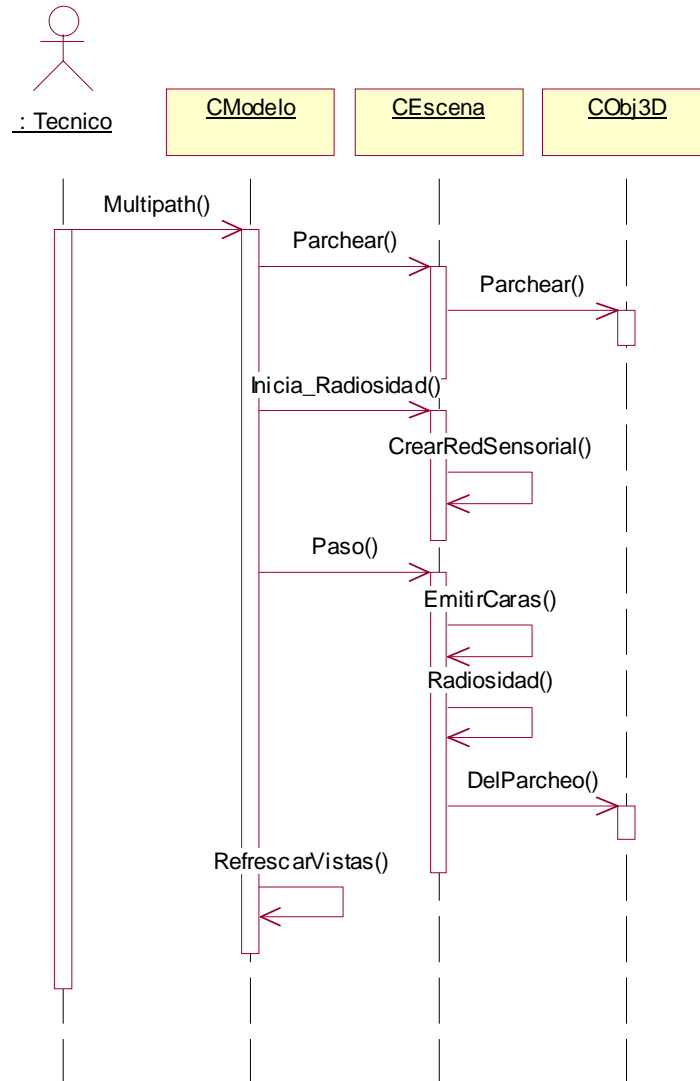
### 7.3.3.13 Escenario 8.4: Modificación de preferencias sobre los sensores



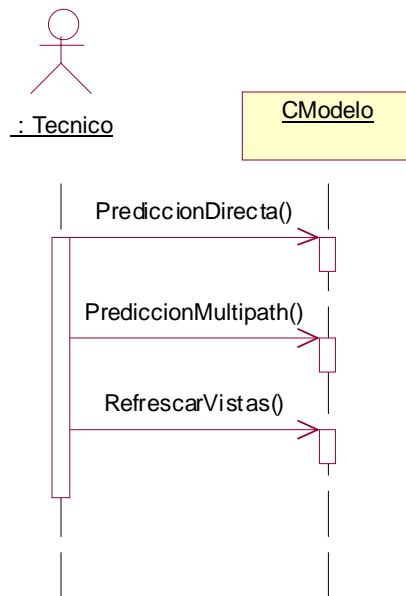
### 7.3.3.14 Escenario 9.1: Predicción de propagación directa



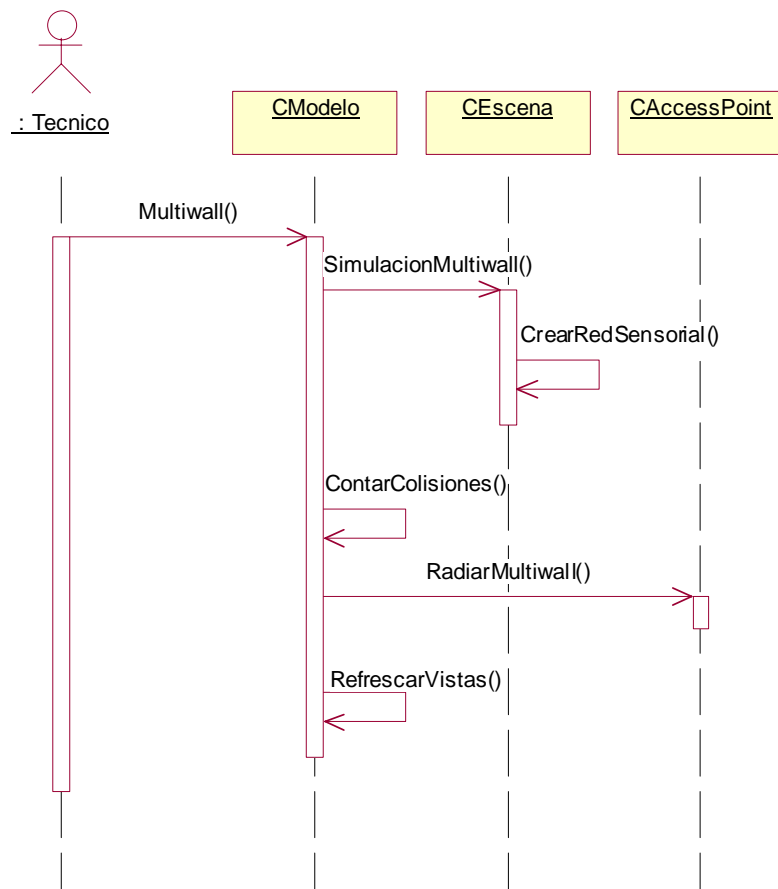
### 7.3.3.15 Escenario 9.2: Predicción de propagación multitrayecto



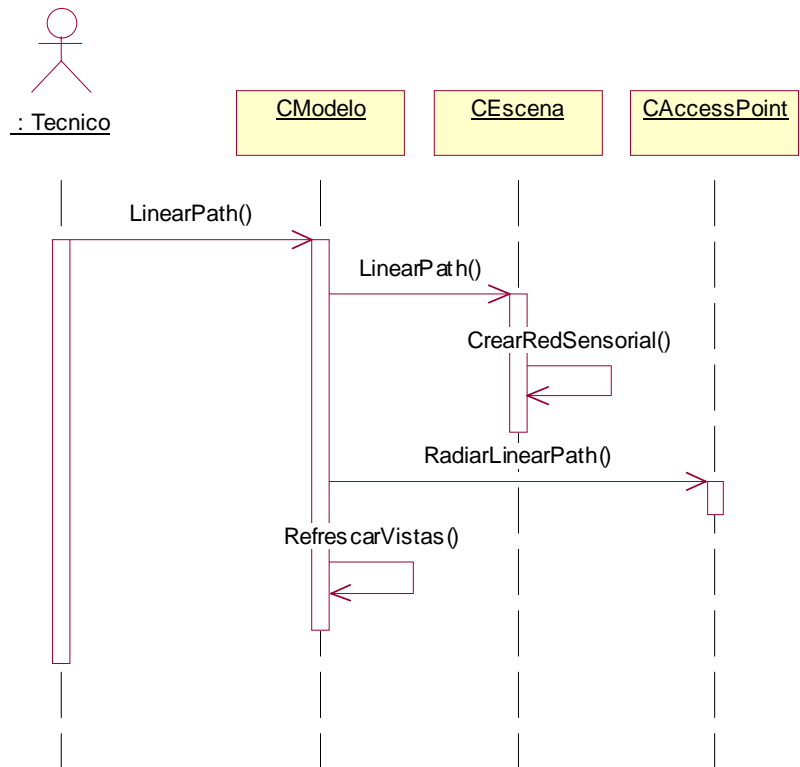
### 7.3.3.16 Escenario 9.3: Predicción de propagación conjunta



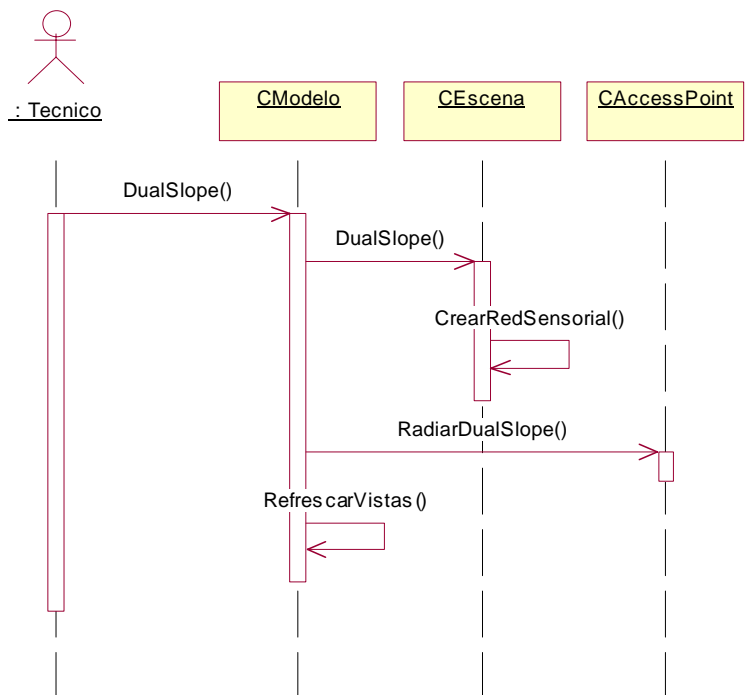
### 7.3.3.17 Escenario 9.4: Predicción de propagación multi-wall



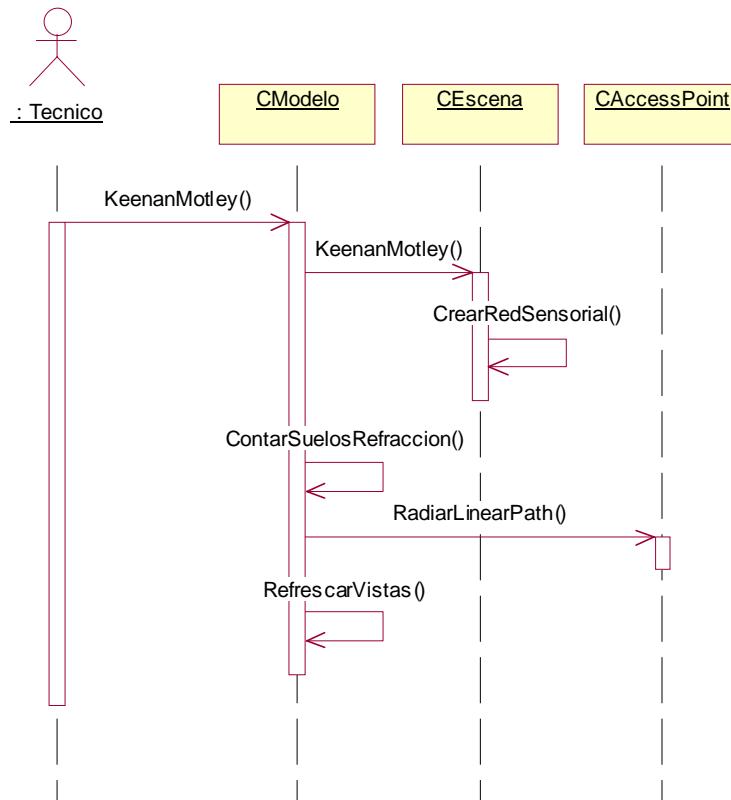
### 7.3.3.18 Escenario 9.5: Predicción de propagación linear path



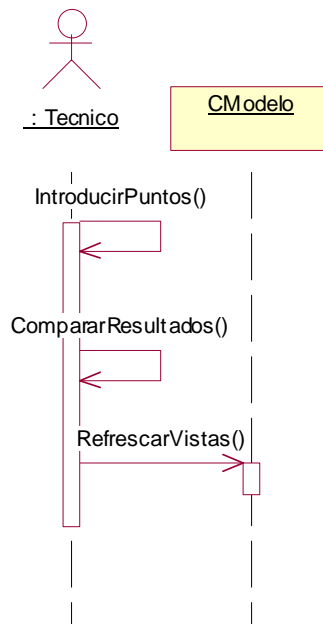
### 7.3.3.19 Escenario 9.6: Predicción de propagación dual slope



### 7.3.3.20 Escenario 9.7: Predicción de propagación Keenan-Motley

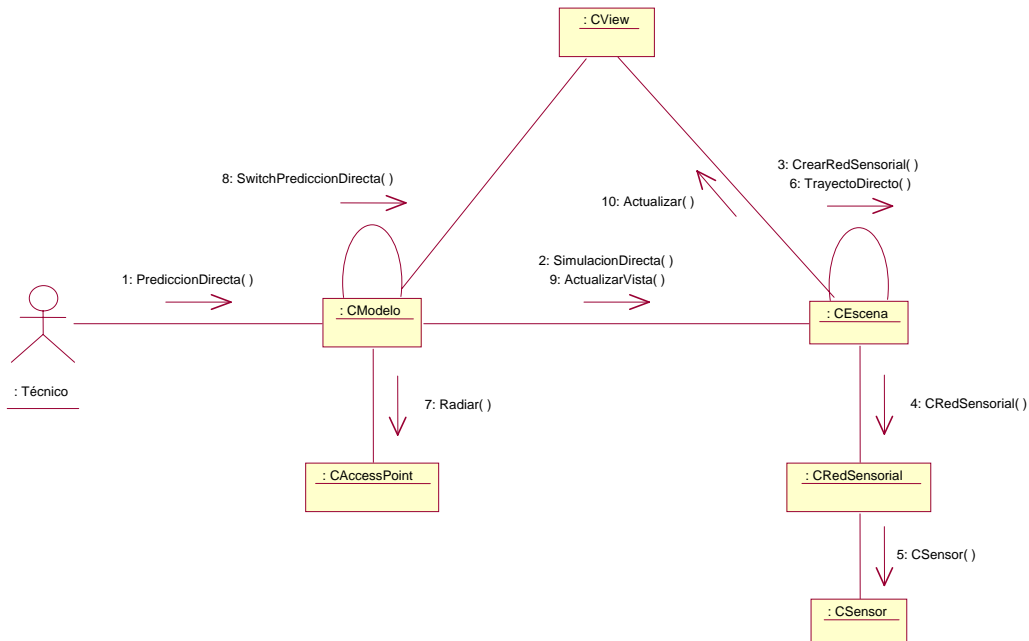


### 7.3.3.21 Escenario 10.1: Comparación de resultados

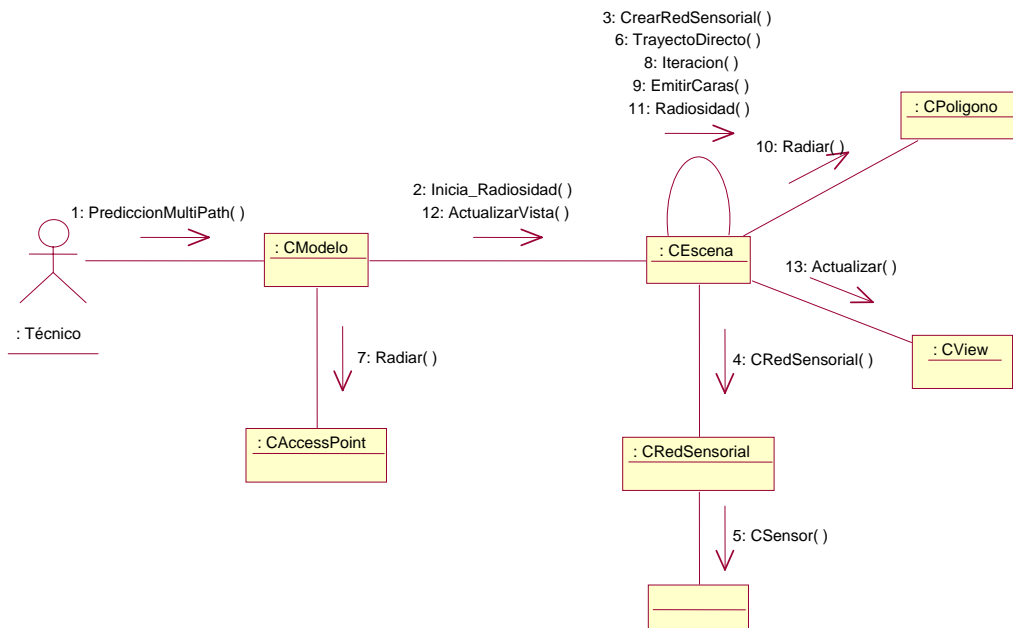


### 7.3.4 Diagramas de Colaboración

#### Predicción Directa



#### Predicción Multitrayecto





## 7.3.5 Descripción de Clases

### 7.3.5.1 Cmodelo

**Nombre:** Cmodelo

**Definición:** Representa el modelo 3D del edificio completo sobre el que se va a llevar a cabo el estudio de cobertura, estando compuesto por una o más plantas/escenas.

**Responsabilidades:**

- Gestión de escenas
- Planificación de la instalación
- Simulación de métodos de propagación.

**Atributos clave:**

- Lista de Escenas
- Lista de Puntos de Acceso

**Relaciones:**

- Superclases: ninguna
- Subclases: ninguna
- Asociaciones:
  - En un Cmodelo se instalan cero o más CaccessPoint
  - Un Cmodelo contiene cero ó más Cescena
  - Un Cmodelo tiene un CLoadASE

**Estados:** No tiene

**Operaciones:**

*AddAccessPoint()*: añade un nuevo Punto de Acceso a la instalación.

*BorrarEscena()*: elimina una escena del sistema.

*CargarASE()*: carga el fichero ASE.

*Cargar\_simulacion()*: carga una simulación.

*Cmodelo()*: constructor de la clase.

*ConfigurarAccessPoint()*: establece los parámetros básicos de funcionamiento de un Punto de Acceso.

*ConfigurarMaterial()*: establece los parámetros para un material.

*ConfigurarRS()*: configura los parámetros de la red sensorial.

*DesmontarAccessPoint()*: Desmonta un Punto de Acceso hasta ese momento operativo

*DualSlope()*: simula por el método de propagación dual slope.

*ExisteAccessPoint()*: informa si un Punto de Acceso pertenece a la instalación a través de su identificativo

*ExisteMaterial()*: comprueba si el material existe.

*Guardar\_Sensores()*: guarda información de los sensores.

*Guardar\_simulacion()*: guarda toda la simulación.

*KeenanMotley()*: simula por el método de propagación Keenan-Motley.

*LinearPath()*: simula por el método de propagación Linear Path.

*MoverAccessPoint()*: traslada de ubicación un Punto de Acceso operativo

*Multipath()*: simulación de resultados de propagación multitrayecto de la instalación.

*Multiwall()*: simula por el método de propagación multiwall.

*NuevaEscena()*: añade una escena al modelo ubicándola como la planta inmediatamente superior a la última cargada de modo correcto.

*PrediccionDirecta()*: simulación de resultados de propagación directa de la instalación.

*ActualizarVistas()*: actualiza todas las vistas según parámetros actuales de visualización.

*ReiniciarModelo()*: borra todas las escenas del modelo.

*SwitchPlanificacion()*: control de conmutador para la visualización de la instalación.

*SwitchPrediccionDirecta()*: conmutador para la presentación gráfica de resultados de predicción.

### 7.3.5.2 Cemisor

**Nombre:** Cemisor

**Definición:** Clase abstracta que representa un elemento con capacidad para realizar emisiones radioeléctricas.

**Responsabilidades:**

- Radiar señal a un receptor según modelo de propagación

**Atributos clave:**

- PLd0, d0, n, Xsigma (variables que intervienen en la formula general del modelo de propagación directa).
- af, aw (propagación multiwall).
- a, PL1m (propagación linear path).
- dBr, a0, n1, n2, landa (propagación dual slope).

**Relaciones:**

- Superclases: ninguna
- Subclases: CaccessPoint y Cpoligono

**Estados:** No tiene

**Operaciones:**

*PL()*: Calcula la pérdida de propagación con arreglo al modelo de propagación establecido.

### 7.3.5.3 CaccessPoint

**Nombre:** CaccessPoint

**Definición:** Punto de Acceso 802.11b

**Responsabilidades:**

- Radiar señal a un receptor según modelo de propagación y parámetros de funcionamiento definidos.

**Atributos clave:**

- Identificador
- Posición
- Potencia de transmisión
- Anchura de haz
- Orientación

**Relaciones:**

- Superclases: Cemisor
- Subclases: ninguna
- Asociaciones:
  - Un CaccessPoint está contenido en un Cmodelo

**Estados:** No tiene

**Operaciones:**

*CaccessPoint()*: constructor que crea un punto de acceso mediante su identificador único y su ubicación.

*~CaccessPoint()*: destructor de la clase utilizado cuando se desmonta un punto de acceso.

*Cargar\_accessPoint()*: carga la información del punto de acceso.

*Guardar\_accessPoint()*: guarda la información del punto de acceso.

*Radiar()*: Radiar señal a un receptor según modelo de propagación y parámetros de funcionamiento definidos.

*RadiarCara()*: radia señal a un punto receptor.

### 7.3.5.4 Cescena

**Nombre:** Cescena

**Definición:** Representa cada una de las plantas que componen Cmodelo; contiene los datos de la estructura de una planta del edificio como un conjunto de objetos representados a través de un conjunto de superficies triangulares. Cada uno de estos objetos será de un material cuyas características de penetración de señal y reflectividad están parametrizadas.

**Responsabilidades:**

- Crear la red de sensores de medición de cobertura
- Predicción de señal por todos los métodos de propagación disponibles.

**Atributos clave:**

- Lista de Objetos
- Lista de Materiales
- Vista de presentación de la escena y resultados
- Red Sensorial de medición de resultados

**Relaciones:**

- Superclases: ninguna
- Subclases: ninguna
- Asociaciones:
  - Una Cescena está contenida en un Cmodelo
  - Una Cescena contiene cero o más Cobj3D
  - Una Cescena contiene cero o más Cmaterial
  - Una Cescena contiene una CredSensorial de medición de resultados
  - Una Cescena se visualiza en una ventana Cview

**Estados:** No tiene

**Operaciones:**

*Cargar\_Escena()*: carga una escena del fichero de simulación.

*Cescena()*: constructor que crea una nueva escena asignándole una vista de visualización.

*~Cescena()*: destructor de la escena.

*CrearRedSensorial()*: crea una red de sensores de medición de los resultados de simulación.

*DualSlope()*: realiza la simulación dual slope para la escena.

*EmitirCaras()*: emisión de energía reflejada de las caras de una escena a su entorno.

*Guardar\_Escena()*: guarda la escena.

*IniciaRadiosidad()*: calcula la energía reflejada inicial en una escena.

*KeenanMotley()*: realiza la simulación Keenan-Motley para la escena.

*LinearPath()*: realiza la simulación Linear Path para la escena.

*Parchear()*: parchea las caras de todos los objetos de la escena de modo que se cumpla que su área no sea mayor que Cmodelo::tamParche.

*Radiosidad()*: realiza las transferencias de energía entre caras de la escena por reflexión de señales según cálculo de radiosidad por refinamiento progresivo.

*SimulacionDirecta()*: realiza la simulación directa de la escena.

*SimulacionMultiwall()*: realiza la simulación multiwall de la escena.

*TrayectoDirecto()*: calcula las pérdidas totales por penetración de obstáculos en el trayecto entre un emisor y un receptor.

### **7.3.5.5 CredSensorial**

**Nombre:** CredSensorial

**Definición:** Red de sensores que cubre la totalidad de una escena para controlar los resultados de las simulaciones efectuadas.

**Responsabilidades:**

- Medición de resultados

**Atributos clave:**

- Altura
- Precisión
- Número de sensores

**Relaciones:**

- Superclases: ninguna
- Subclases: ninguna
- Asociaciones:
  - Una CredSensorial pertenece a una Cescena
  - Una CredSensorial contiene uno o más Csensor

**Estados:** No tiene

**Operaciones:**

*CredSensorial()*: constructor de la clase que crea una red de sensores en base a las dimensiones de anchura y longitud de la escena y precisión requerida.

*Cargar\_redsensorial()*: carga los valores de la red sensorial.

*Guardar\_redsensorial()*: guarda los valores de la red sensorial.

*ResetManual()*: resetea todos los sensores indicando que no deben hacer la comparación manual

*ResetMP()*: pone el valor de multipath al mínimo en todos los sensores de la red

*ResetRefraccion()*: resetea la refracción de todos los sensores de la red.

*Reset()*: resetea a valores de partida los sensores de medición de resultados.

### 7.3.5.6 Csensor

**Nombre:** Csensor

**Definición:** Sensor de medición ubicado en un punto de la escena

**Responsabilidades:**

- Medición de resultados

**Atributos clave:**

- Posición
- Lista de valores medidos

**Relaciones:**

- Superclases: ninguna
- Subclases: ninguna
- Asociaciones:
  - Un Csensor pertenece a una CredSensorial

**Estados:** No tiene

**Operaciones:**

*Cargar\_Sensor()*: carga la información del sensor.

*Color()*: calcula el color de representación de resultados en base al conjunto de valores medidos.

*Csensor()*: constructor que crea un sensor en fijando inicializando su lista de valores medidos.

*Guardar\_Sensor()*: guarda la información del sensor.

*SetPosicion()*: fija la posición del sensor en la escena

*SolapamientoFr()*: comprueba si se cumple la condición de solapamiento de frecuencias de canal.

*valorMax()*: devuelve el valor de potencia máximo medido por los sensores de recepción de señal.

### **7.3.5.7 Cobj3D**

**Nombre:** Cobj3D

**Definición:** Representa cada uno de los objetos tridimensionales que componen la escena

**Responsabilidades:**

- Representación de la escena
- División de Caras para obtener precisión en el cálculo de propagación multitrayecto

**Atributos clave:**

- Lista de Caras
- Lista de Vértices
- Lista de Normales

**Relaciones:**

- Superclases: ninguna
- Subclases: ninguna
- Asociaciones:
  - Un Cobj3D pertenece a una Cescena
  - Un Cobj3D contiene uno o más Cpoligono
  - Un Cobj3D contiene tres o más Cvertice

**Estados:**

**Operaciones:**

*Cargar\_objeto()*: carga un objeto.

*DelParcheo()*: restablece el objeto al estado anterior al parcheo.

*Guardar\_objeto()*: guarda un objeto.

*Init\_Parcheo()*: guarda backup de vértices y caras antes de parcheo y redimensiona nuevas listas.

*Parchear()*: Divide las caras del objeto en una serie de subcaras o parches de modo que la superficie de cada cara no supere un valor máximo fijado como parámetro.

*ParchearCara()*: divide cada cara en parches más pequeños.



### **7.3.5.8 Cvertice**

**Nombre:** Cvertice

**Definición:** Punto en el espacio tridimensional

**Responsabilidades:**

- Representación de la escena
- Operaciones algebraicas

**Atributos clave:**

- Coordenadas x, y, z.

**Relaciones:**

- Superclases: ninguna
- Subclases: ninguna
- Asociaciones:
  - Un Cvertice pertenece a un Cobj3D
  - Un Cvertice es extremo de una arista de uno o más Cpoligono

**Estados:**

**Operaciones:**

Operaciones algebraicas con vectores: suma, resta, producto escalar y vectorial...

### **7.3.5.9 Cpolígono**

**Nombre:** Cpolígono

**Definición:** Cada una de las superficies triangulares en que se descompone un objeto

**Responsabilidades:**

- Radiar en la simulación de propagación multitrayecto
- Operaciones algebraicas

**Atributos clave:**

- Referencia a 3 vértices que sirven de unión a sus aristas

**Relaciones:**

- Superclases: Cemisor
- Subclases: ninguna
- Asociaciones:

- Un Cpoligono pertenece a un Cobj3D
- Un Cpoligono contiene tres Cvertice

**Estados:** No tiene

**Operaciones:**

*Area()*: calcula el área de la superficie

*CalcularCentro()*: calcula el punto central de la superficie

*Cargar\_poligono()*: carga un polígono.

*Guardar\_poligono()*: guarda un polígono.

*Radiar()*: Radiar señal a un receptor según modelo de propagación y parámetros de funcionamiento definidos.

### **7.3.5.10 Cmaterial**

**Nombre:** Cmaterial

**Definición:** Definición de las características relevantes de los materiales presentes en la escena

**Responsabilidades:**

- Parametrizar materiales para cálculos de penetración y reflexión de señal.

**Atributos clave:**

- Nombre del material
- Penetrabilidad (atenuación de transmisión)
- Reflectividad

**Relaciones:**

- Superclases: ninguna
- Subclases: ninguna
- Asociaciones
  - Un Cmaterial va a estar presente en una Cescena
  - Un Cmaterial va a aparecer en cero o más Cobj3D

**Estados:** No tiene

**Operaciones:**

*Cargar\_material()*: carga el material.

Guardar\_material(): guarda el material.

#### 7.3.5.11 CLoadASE

**Nombre:** CLoasASE

**Definición:** Cargador de ficheros ASE. Carga escenas desde ficheros ASE.

**Responsabilidades:**

- Cargar los ficheros ASE que representan una escena.

**Atributos clave:**

- Fichero con la escena.

**Relaciones:**

- Superclases: ninguna
- Subclases: ninguna
- Asociaciones
  - Un CLoadASE va a estar presente en un Cmodelo

**Estados:** No tiene

**Operaciones:**

*ImportarASE()*: carga una escena de un fichero ASE.

#### 7.3.5.12 Cview

**Nombre:** Cview

**Definición:** Vista de una escena y sus resultados de simulación

**Responsabilidades:**

- Visualización de una escena
- Visualización gráfica de resultados
- Guardar resultados

**Atributos clave:**

- Escena
- Ventana

**Relaciones:**

- Superclases: ninguna
- Subclases: ninguna
- Asociaciones:
  - Una Cview va a representar una Cescena

**Estados:** No tiene

**Operaciones:**

*Guardar()*: guarda la vista actual en un fichero.

*InicializarVentana()*: inicializa la ventana para su visualización.

*RedibujarVentana()*: dibuja la ventana.

*RefrescarVistas()*: refresca la ventana con los datos actuales de la escena.

*Rotar()*: rota la vista.

*Trasladar()*: traslada la vista.

*Zoom()*: Acerca la vista.

## 7.4 Diseño detallado

### 7.4.1 Memoria del Diseño Detallado

Se ha decidido utilizar la librería de gráficos 3D OpenGL para llevar a cabo la visualización de modelo y resultados lo que conlleva la definición de una serie de nuevas funciones de inicialización y control propias de este entorno. OpenGL se define estrictamente como “una interfaz software para gráficos por hardware”. En esencia, es una librería de gráficos 3D y modelado, portátil y muy rápida.

En la clase Cobj3D se han implementado mecanismos de backup para los valores originales cargados desde fichero de las listas de caras y vértices. Así, una vez llevado a cabo el proceso de parcheo, es posible la vuelta a la situación de partida una vez que se finalizan los cálculos de radiosidad. Esto trae consigo la ventaja de no complicar los cálculos de colisiones en propagación directa por el mayor número de superficies que contendrá cada objeto.

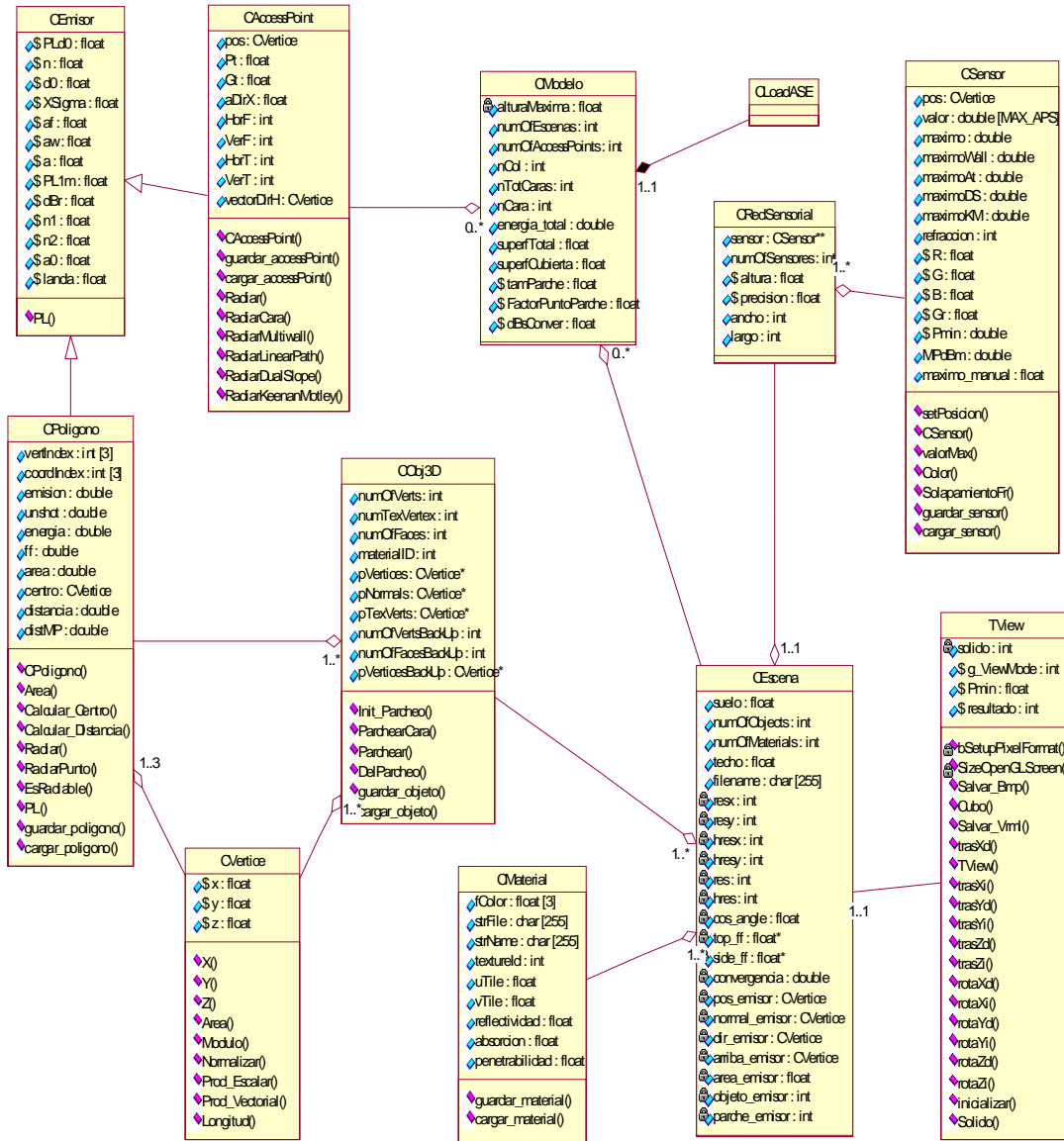
Adicionalmente, se ha tenido en cuenta necesidad de llevar a cabo el control de los parámetros asociados a los materiales desde la clase Cmodelo, ya que podría darse el caso que un mismo material presente en objetos Cescena distintos tengan una parametrización diferente.

Finalmente para cada clase se ha determinado:

- Las operaciones necesarias para crear y eliminar una ocurrencia.
- La accesibilidad de las operaciones y atributos

- El tipo de todos los atributos y parámetros

### 7.4.2 Diagramas de Clases



### 7.4.3 Diagramas de Secuencia

No ha hecho falta modificar los diagramas de secuencia hechos en la fase de análisis por lo tanto son válidos los descritos anteriormente.

## 7.4.4 Descripción Detallada de Clases — Diccionario de Datos

### 7.4.4.1 Cmodelo

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
Cmodelo	Final	Modelo 3D de un edificio completo	-	
<i>Responsabilidades</i>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Gestión de modelos 3D			
2	Gestionar la creación y eliminación de escenas			
3	Gestionar la creación y eliminación de Punto de Accesos			
4	Guardar y cargar las simulaciones			
5	Exportar los resultados			
6	Realizar las predicciones de cobertura			
<i>Métodos</i>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Público	int	NuevaEscena		Cescena* pEscena
Público	int	BorrarEscena		Cescena* pEscena
Público		AddAccessPoint		string Id, Cvertice pos
Público		DesmontarAccessPoint		int nId
Público		MoverAccessPoint		int nId, Cvertice newPos
Público		ConfigurarAccessPoint		int nId, □ odel param1, ...
Público	int	ExisteAccessPoint		string Id
Público		PrediccionDirecta		
Público		MultiPath		
Público		Multiwall		
Público		LinearPath		
Público		DualSlope		
Público		KeenanMotley		
Público		SwitchPlanificacion		bool flag
Público		SwitchPrediccionDirecta		bool flag
Público		ConfigurarMaterial		string Id, float p1, float p2
Público		ExisteMaterial		string Id
Público		RefrescarVistas		
Público		ConfigurarRS		
Público		Cmodelo		
Público		ReasignarEscenas		
Público	int	Nivel		□ odel altura
Público		ReiniciarModelo		
Público		guardar_Sensores		char *filename
Público		guardar_simulacion		char *filename
Público		cargar_simulacion		char *filename
Público		cargarASE		Cescena *pEscena, char *filename
Público	bool	verPlanif	static	
Público	bool	verPredicc	static	
<i>Atributos</i>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Público	vector<Cescena*>	pEscenas	No	
Público	vector<CaccessPoint*>	pAccessPoint	No	
Público	int	numOfEscenas	No	
Público	int	numOfAccessPoints	No	
Privado	bool	verPlanificacion	Si	
Privado	bool	verPrediccion	Si	
Público	float	tamParche	Si	
Público	float	factorPuntoParche	Si	

Público	float	dBsConver	Si
Público	bool	verPlanFrecuencias	Si
Público	int	simulado[]	No
Privado	float	alturaMaxima	No
Público	CLoadASE	g_LoadASE	No
Público	double	energia_total	No
<b>Observaciones</b>			
<p>ConfigurarRS(): reconfigura redes sensoriales de todas las escenas por modificación en parámetros comunes</p> <p>tamParche: define el valor máximo del área de una cara para el tratamiento de multitrayecto</p> <p>factorPuntoParche: relación de proporcionalidad para extrapolar la energía calculada en el punto central a todo el área de la cara.</p> <p>Energia_total: energía reflejada inicial al comienzo del tratamiento de la propagación multitrayecto</p>			

### 7.4.4.2 Cemisor

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
Cemisor	Abstracta	Elemento que emite señales radioeléctricas	-	
<b>Responsabilidades</b>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Radiar señal a un receptor o conjunto de receptores			
2	Guardar las variables que intervienen en los diferentes métodos de propagación			
<b>Métodos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Público	float	PL	static	<input type="checkbox"/> o del distancia
<b>Atributos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Público	float	PLd0	Si	
Público	float	d0	Si	
Público	float	n	Si	
Público	float	Xsigma	Si	
Público	float	af	Si	
Público	float	aw	Si	
Público	float	a	Si	
Público	float	PL1m	Si	
Público	float	dBr	Si	
Público	float	n1	Si	
Público	float	n2	Si	
Público	float	a0	Si	
Público	float	landa	Si	
<b>Observaciones</b>				
<p>PL(): calcula la pérdida de trayecto directo según formula de modelo de propagación.</p> <p>PLd0: perdida de trayecto hasta distancia d0 según modelo de propagación</p> <p>d0: distancia de referencia utilizada en el modelo de propagación</p> <p>n: variable de perdida de trayecto definida en el modelo de propagación</p> <p>Xsigma: desviación típica</p> <p>af, aw: atenuación de los suelos y de los muros (para propagación multiwall)</p> <p>a: factor de atenuación lineal (para propagación linear path)</p> <p>dBr: distancia de break point (para dual slope)</p> <p>n1,n2: índices de perdida de trayecto antes y después de dBr</p> <p>a0: diferencia entre espacio libre y Dual Slope</p> <p>landa: longitud de onda de la señal radiada</p>				

### 7.4.4.3 CaccessPoint

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
CaccessPoint	Final	Estación base de una red inalámbrica	Cemisor	
<i>Responsabilidades</i>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Radiar señal al entorno			
<i>Métodos</i>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Público		CaccessPoint		AnsiString& nom,float X,float Y,float Z
Público		guardar_accesspoint		FILE *
Público		cargar_accesspoint		FILE *
Público		Radiar		Cescena* pEscena, int nAP
Público	float	RadiarCara		Cvertice centro
Público	float	RadiarMultiwall		Cvertice centro,int nf,int nw
Público	float	RadiarLinearPath		Cvertice centro
Público	float	RadiarDualSlope		Cvertice centro
Público	float	RadiarKeenanMotley		Cvertice centro, int kf, float PLfs
<i>Atributos</i>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Público	string	nombre	No	
Público	Cvertice	posición	No	
Público	float	Pt	No	
Público	float	Gt	No	
Público	Cvertice	VecDirH	No	
Público	float	aDirX	No	
Público	float	HorF	No	
Público	float	HorT	No	
Público	float	VerF	No	
Público	float	VerT	No	
<i>Observaciones</i>				
Pt: Potencia de emisión aDirX: orientación horizontal del frontal del AP HorF,VerF,HorT,VerT: anchuras de haz frontal y trasera de los lóbulos horizontal y vertical.				



## 7.4.4.4 Cescena

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
Cescena	Final	Cada planta que compone el modelo	-	
<i>Responsabilidades</i>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Predicción de modelos de propagación			
2	Gestión de la red sensorial			
<i>Métodos</i>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Público	int	SimulacionDirecta		
Privado	float	TrayectoDirecto		Cvertice Xn, Xsig
Privado	float	TrayectoDirectoMP		Cvertice Xn, Xsig
Público		Inicia_Radiosidad		
Público		Paso		
Privado		Radiosidad		
Privado		Parchear		
Privado		EmitirCaras		
Privado		CrearRedSensorial		
Privado		ConfigurarRS		
Público	float	maxX,maxY,maxZ		
Público	float	minX, minY, minZ		
Público		elear		<input type="checkbox"/> odel suelo
Público		guardar_escena		FILE *
Público		cargar_escena		FILE *
Público		<input type="checkbox"/> odelling <input type="checkbox"/> _multiwall		
Público		linearpath		
Público		dualslope		
Público		keenanmotley		
Privado		hacer_modelo_escena		
Privado		asignar_campos		
Privado		actualiza_FF		<input type="checkbox"/> odel* ff, int yres
Privado		calcular_top_FF		
Privado		calcular_side_FF		
Público		Cescena		Cview* vista
Público		~Cescena		
Privado		contarColisiones		Cvertice Xn, Cvertice <input type="checkbox"/> od,int *muros, int *suelos
Privado	float	contarSuelosRefraccion		Cvertice Xn, Cvertice <input type="checkbox"/> od, int *suelos
<i>Atributos</i>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Público	vector<Cmaterial>	pMaterials	No	
Público	vector<Cobj3D>	pObjetos	No	
Público	int	numOfMaterials	No	
Público	int	numOfObjects	No	
Público	CredSensorial*	pRS	No	
Público	bool	Ractiva	No	
Público	Cview*	vista	No	
Público	double	convergencia	No	
Privado	int	objeto_emisor	No	
Privado	int	parche_emisor	No	
Privado	float	area_emisor	No	
Privado	Cvertice	pos_emisor	No	
Privado	Cvertice	normal_emisor	No	
Privado	Cvertice	dir_emisor	No	

Privado	Cvertice	arriba_emisor	No
<b>Observaciones</b>			
<p>maxX(),maxY(),maxZ(),minX(),minY(),minZ(): devuelven los valores máximos y mínimos de cada coordenada para determinar los límites de la escena en cada dimensión.                  Objeto_emisor: objeto que contiene la cara con más energía reflejada, se utiliza para el cálculo de radiosidad                  parche_emisor: parche con más energía reflejada, se utiliza para el cálculo de radiosidad                  convergencia: relación entre energía reflejada inicial de la escena y energía sin disparar del parche_emisor                  Paso(): Función que ejecuta un paso en la iteración para un nuevo cálculo de la radiosidad en la escena.                  Radiosidad(): Función utilizada para disparar la energía del parche_emisor del objeto_emisor.</p>			

#### 7.4.4.5 CredSensorial

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
CredSensorial	Final	Red de sensores desplegada en una escena	-	
<b>Responsabilidades</b>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Medición de niveles de potencia de señales de una escena			
<b>Métodos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Publico		CredSensorial		float maxX,float minX,float maxY,float minY, float suelo
Publico		Reset		
Publico		ResetDirecta		
Publico		ResetMP		
Publico		ResetRefraccion		
Publico		ResetMultiwall		
Publico		ResetLinearPath		
Publico		ResetDualSlope		
Publico		ResetKeenanMotley		
Publico		ResetManual		
Publico		guardar_redsensorial		FILE *
Publico		cargar_redsensorial		FILE *
Publico	Csensor*	ObtenerSensor		<input type="checkbox"/> odel x, <input type="checkbox"/> odel z
Publico	float	SuperfTotal		
Publico	float	Balance		
<b>Atributos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Publico	Csensor**	sensor	No	
Publico	int	numOfSensores	No	
Publico	float	ancho, largo	No	
Publico	float	altura	Si	
Publico	float	precision	Si	
<b>Observaciones</b>				
<p>SuperfTotal(): devuelve la superficie en m2 cubierta por la red de sensores                  ResetRefraccion(): resetea a valores de partida el sensor de medición de pérdidas de penetración.                  Reset(): resetea los valores de todos los sensores y para todos los modelos al nivel mínimo.                  Los demás métodos resetean los valores únicamente para el modelo correspondiente                  Balance(): realiza informe de superficie de cobertura cubierta por la instalación.</p>				

## 7.4.4.6 Sensor

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>
Csensor	Final	Sensor de medición colocado en el Escena	-
<b>Responsabilidades</b>			
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>		
1	Medición de niveles de potencia de señales en un punto de la Escena		
<b>Métodos</b>			
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>
Publico		Csensor	
Publico		setPosicion	float x, float y, float z
Publico	float	valorMax	
Publico	bool	solapamientoFr	
Publico		Color	
Publico		guardar_sensor	FILE *
Publico		cargar_sensor	FILE *
<b>Atributos</b>			
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>
Público	Cvertice	pos	No
Publico	double	valor[]	No
Publico	double	maximo	No
Publico	double	maximoWall	No
Publico	double	maximoAt	No
Publico	double	maximoDS	No
Publico	double	maximoKM	No
Publico	double	maximo_manual	No
Publico	double	MPdBm	No
Publico	int	refraccion	No
Publico	bool	vermanual	No
Publico	float	Pmin	Si
Publico	float	R, G, B	Si
Publico	float	Gr	Si
<b>Observaciones</b>			
refraccion: registra las pérdidas de penetración entre el sensor y un emisor determinado Pmin: Define la sensibilidad mínima de recepción del emisor R,G,B: Utilizadas para el cálculo del color del área de influencia del sensor en la representación de resultados MPdBm: potencia de señal multitrayecto recibida. Maximo*: indica el valor máximo medido en el sensor para el modelo correspondiente.			

### 7.4.4.7 Cobj3D

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
Cobj3D	Final	Objeto tridimensional dentro de la escena	-	
<b>Responsabilidades</b>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Control de la división en parches previo a la Radiosidad			
<b>Métodos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Público	int	Parchear		<input type="checkbox"/> o del areaMax
Público		Init_Parcheo		<input type="checkbox"/> o del areaMax
Público	bool	Parchear_Cara		int nParche, <input type="checkbox"/> o del areaMax
Público		DelParcheo		
Público		cargar_objeto		FILE *
Público		guardar_objeto		FILE *
<b>Atributos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Público	Cvertice*	pVertices	No	
Público	Cpoligono*	pFaces	No	
Público	Cvertice*	pNormals	No	
Público	Cvertice*	pTexVerts	No	
Público	int	numOfVertsBackUp	No	
Público	int	numOfFacesBackUp	No	
Público	Cvertice*	pVerticesBackUp	No	
Público	Cpoligono*	pFacesBackUp	No	
Público	int	numOfVerts	No	
Público	int	numTexVertex	No	
Público	int	numOfFaces	No	
Público	int	materialID	No	
Público	bool	bHasTexture	No	
<b>Observaciones</b>				
Parchear(): divide las caras de un objeto de modo que su área no supere el valor areaMax Init_Parcheo(): hace un backup antes de iniciar el parcheo DelParcheo(): restaura los valores originales que definían el objeto previos al parcheo. numOfVertsBackUp, numOffFacesBackUp, pVerticesBackUp, PfacesBackUp: utilizadas para guardar los valores originales del objeto cuando se realiza el parcheo para radiosidad				

## 7.4.4.8 Cvertice

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
Cvertice	Final	Punto o vector en el espacio tridimensional	-	
<b>Responsabilidades</b>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Operaciones algebraicas			
<b>Métodos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Público	float	Longitud		Cvertice centro
Público	float	Area		const Cvertice & V1, const Cvertice & V2
Público	float	Modulo		
Público	float	Normalizar		
Público	float	Prod_Escalar		const Cvertice & V
Público	Cvertice	Prod_Vectorial		const Cvertice & V
Público		<input type="checkbox"/> odellin +		
Público		<input type="checkbox"/> odellin -		
Público		<input type="checkbox"/> odellin *		
Público	float	X		
Público	float	Y		
Público	float	Z		
<b>Atributos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Público	float	x	No	
Público	float	y	No	
Público	float	z	No	
<b>Observaciones</b>				
ProdEscalar(): producto escalar de dos vectores ProdVectorial(): producto vectorial de vector (x,y,z) con otro vértice pasado como parámetro Modulo(): modulo del vector (x,y,z) Normalizar(): normaliza el vector (x,y,z) Longitud(): longitud desde el vértice hasta otro vértice pasado como parámetro.				

### 7.4.4.9 Cpolígono

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
Cpoligono	Final	Superficie triangular que compone un objeto	Cemisor	
<i>Responsabilidades</i>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Operaciones algebraicas			
2	Radiar la escena (multiPath)			
<i>Métodos</i>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Público		Cpoligono		
Público	float	Area		Cvertice *p
Público	Cvertice	Calcular_Centro		Cvertice* vertArray
Público		Calcular_Distancia		Cvertice Xn
Público		Radiar		Cescena* pEscena,int nObj,int nFace
Público	float	PL	virtual	□ odel R
Público	bool	esRadiable		Cvertice Xn, Cvertice □ od, Cvertice* vertArray
Público		guardar_poligono		FILE *
Público		cargar_poligono		FILE *
<i>Atributos</i>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Público	int	vertIndex[]	No	
	int	coordIndex[]	No	
Público	double	unshot	No	
Público	float	ff	No	
Público	float	energia	No	
Público	float	emision	No	
Público	float	area	No	
Público	Cvertice	centro	No	
Público	double	distancia	No	
Público	double	distMP	No	
<i>Observaciones</i>				

## 7.4.4.10 Cmaterial

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
Cmaterial	Final	Material de los objetos de la escena	-	
<b>Responsabilidades</b>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Información de las propiedades y características de los materiales			
<b>Métodos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Público		guardar_material		FILE *
Público		cargar_material		FILE *
<b>Atributos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Público	float	penetrabilidad	No	
Público	float	absorcion	No	
Público	float	reflectividad	No	
Público	float	fColor[]	No	
Público	float	strFile[]	No	
Público	float	□ odelli[]	No	
Público	bool	bHasTexture	No	
Público	int	textureId	No	
Público	float	uTile	No	
Público	float	vTile	No	
<b>Observaciones</b>				
fColor[3]: color del material en valores RGB strName[] : nombre de la textura				

### 7.4.4.11 Cview

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
Cview	Final	Vista asociada a una escena	-	
<b>Responsabilidades</b>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Presentación gráfica de escenas y resultados			
<b>Métodos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Público		Renderizar_Escena		
Público		Redibujar_Ventana		Cvertice pos
Público		Salvar_Bmp		Ansistring filename
Público		Salvar_Vrml		Ansistring filename
Privado		InitializeOpenGL		
Público		Cubo		Cvertice pos, float size, float r, float g, float b
Público		Plancha		Cvertice pos, float size, float r, float g, float b
Privado	bool	bSetupPixelFormat		HDC hdc
Privado		SizeOpenGLScreen		int width, int height
Privado		RenderScene		Cescena* p3Dmodel
<b>Atributos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Público	HWND	hWnd	No	
Público	RECT	rRect	No	
Público	HDC	hDC	No	
Público	HGLRC	hRC	No	
Público	Cescena*	pEscena	No	
Público	int	g_ViewMode	Si	
Público	float	Pmin	Si	
Público	int	resultado	Si	
<b>Observaciones</b>				
bSetupPixelFormat(): Permite configurar ventana de OpenGL y backbuffered SizeOpenGLScreen(): Inicializa traslaciones y proyecciones de ventana RenderScene(): renderiza la escena completa Cubo(): dibuja un cubo que representara a un Punto de Acceso Plancha(): dibuja una superficie plana para representar la red sensorial hWnd, hDC, hRC: manejadores de la ventana de visualización				



## 7.4.4.12 CLoadASE

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Hereda de...</i>	
CLoadASE	Final	Procedimientos para importar una escena	-	
<b>Responsabilidades</b>				
<i>Número</i>	<i>Descripción</i>			
1	Importar una escena definida en formato ASE			
<b>Métodos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Valor de retorno</i>	<i>Nombre</i>	<i>Modo</i>	<i>Parámetros y tipos</i>
Público	bool	ImportASE		Cescena *pEscena, char* strFileName
Público		RecomputeNormals		Cobj3D *pObject
Privado		ReadASEFile		
Privado	int	GetObjectCount		
Privado	int	GetMaterialCount		
Privado		GetTextureInfo		Cmaterial *pTexture, int desiredMaterial
Privado	float	ReadFloat		
Privado		MoveToObject		int desiredObject
Privado		ReadObjectInfo		Cobj3D *, int desiredObject
Privado		ReadObjectData		Cescena *pModel, Cobj3D *pObject, int desiredObject
Privado		GetData		
Privado		ReadVertex		Cescena *pModel, Cobj3D *pObject, char *strDesiredData, int desiredObject
Privado		ReadFace		Cobj3D *pObject
Privado		ReadTextureVertex		Cobj3D *pObject, Cmaterial texture
Privado		ReadTextureFace		Cobj3D *pObject
Privado		ComputeNormals		Cescena *pModel
Privado	Cvertice	Vector		Cvertice vPoint1, Cvertice vPoint2
Privado	Cvertice	Cross		Cvertice vVector1, Cvertice vVector2
Privado	Cvertice	Normalize		Cvertice vNormal
Privado	Cvertice	AddVector		Cvertice vVector1, Cvertice vVector2
Privado	Cvertice	DivideVectorByScaler		Cvertice vVector1, $\square$ o del Scaler
<b>Atributos</b>				
<i>Acceso</i>	<i>Tipo o clase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Static</i>	
Privado	FILE *	m_FilePointer	No	
<b>Observaciones</b>				
ImportASE(): carga la escena del fichero en pEscena.				
ReComputeNormals(): vuelve a calcular la normal de un objeto				



# CAPÍTULO 8

## IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO: ZONAWIFI

---

El prototipo que implementa el modelo de cobertura basado en Radiosidad por Refinamiento Progresivo, se llama ZonaWiFi, y además de realizar la predicción de cobertura, permite la visualización gráfica y la exportación de los datos de cobertura (intensidad de la señal) en los diversos modelos de propagación que incluye: propagación Directa, propagación Multiwall, propagación Linear-Path, propagación Dual-Slope, y por supuesto, el modelo de propagación basado en radiosidad por refinamiento progresivo que forma el núcleo de esta tesis que se denota por propagación Multitrayecto.

La implementación en el prototipo de otros modelos de propagación, permite que se realicen comparaciones entre ellos, y que se verifiquen las características del modelo propuesto.

Se han realizado 2 versiones del prototipo. En la primera versión, únicamente se podían realizar las predicciones utilizando dos métodos de propagación:

- Una variante de Log-Normal Shadowing Path Loss Model, modificada para que tuviese en cuenta las pérdidas por atenuación al atravesar muros de diferentes características, aprovechando que se disponía del modelado geométrico tridimensional que incluye las características de absorción de los materiales.
- El modelo de propagación basado en radiosidad por refinamiento progresivo, que supone el núcleo de esta tesis.

Además, permitía mezclar ambos métodos sumando la energía que se obtenía utilizando cada uno de los modelos de propagación.

En la segunda versión, se añaden otros modelos de propagación, con el objetivo de realizar comparativas. Y como si se tratase de un método de propagación más, se permite incluir medidas de campo (valores reales medidos en el entorno) para compararlos gráficamente con los resultados calculados usando modelos de propagación.

Ambas versiones de la herramienta del prototipo se ha realizado para entornos Microsoft Windows.

## **8.1 Herramientas utilizadas en la implementación**

Para la implementación del prototipo, se ha decidido usar el lenguaje de programación C++; y como entorno de desarrollo, el C++ Builder.

La representación gráfica en pantalla y la modificación del punto de vista, se han realizado utilizando la biblioteca OPEN GL.

La herramienta elegida para el diseño tridimensional del entorno en dónde se quiere calcular la cobertura, ha sido 3Dstudio Max de Autodesk.

## **8.2 Utilización del prototipo**

Mostraremos el esquema de trabajo con el prototipo, que en líneas generales se puede ver en la *Figura 68*.

En primer lugar, se debe obtener el modelo geométrico tridimensional del entorno. El modelo, se genera utilizando la herramienta 3D Studio, en el que se modelan planta por planta, todos los pisos del edificio en el que requiere aplicar el modelo de propagación.

Una vez modeladas todas las plantas, se exportan en formato ASE (ASCII Scene Export) a ficheros diferentes (uno por cada planta).

Desde el prototipo ZonaWiFi, se importa el modelo introduciendo de forma separada cada planta, empezando por la más baja, e introducidas en orden de abajo hacia arriba.

Una vez cargados los modelos de las plantas en la herramienta, se procede a configurar los parámetros de la aplicación y de los modelos de propagación, y a situar y configurar los puntos de acceso.

En este momento se pueden realizar los cálculos de cobertura en alguno o todos de los modelos de propagación incluidos en el prototipo; y posteriormente, se pasa a analizar los resultados.

De forma resumida, es así como se utiliza el prototipo, pero veremos ahora, más detalladamente cada uno de los pasos.

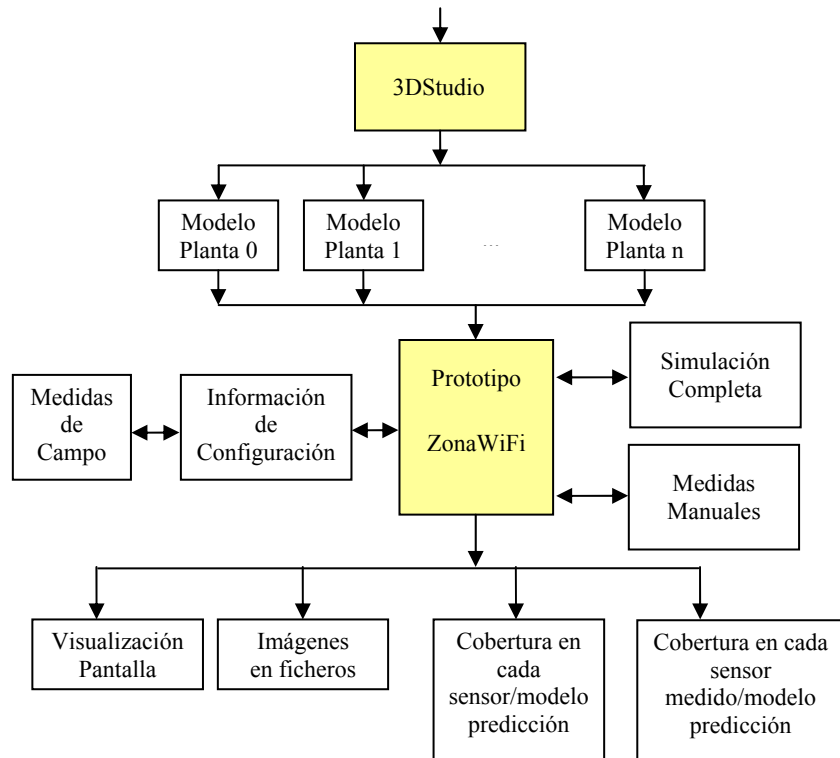


Figura 68 Esquema de trabajo con el prototipo

## 8.2.1 Configuración de los parámetros de los modelos de propagación

Se accede a ellos desde el menú *Configuración* (Figura 69)

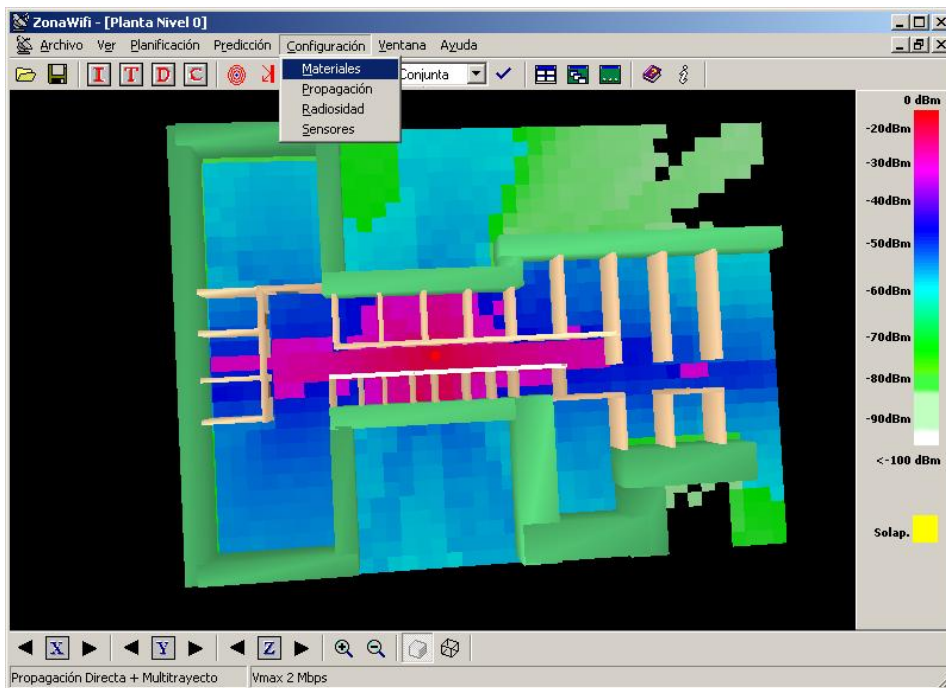


Figura 69 Menú de Configuración

Vamos a considerar como primer paso, la configuración de los parámetros de propagación, aunque también podíamos haber empezado por otras tareas que son independientes. En la *Figura 70* se muestran los diferentes parámetros que se pueden configurar.

Algunos de los parámetros configurables hay que extraerlos de la calibración del sistema; que debe hacerse tomando medidas de campo en el entorno concreto en el que se piensa aplicar el prototipo. Esto nos permitirá ajustarlo al entorno, y que los resultados que nos proporcione sean más fiables.

El parámetro “*Path Loss a 1 metro*” se aplica a varios métodos de propagación, y es una medida de campo tomada en el entorno concreto. De forma separada se deben de introducir los parámetros específicos de cada modelo de propagación.

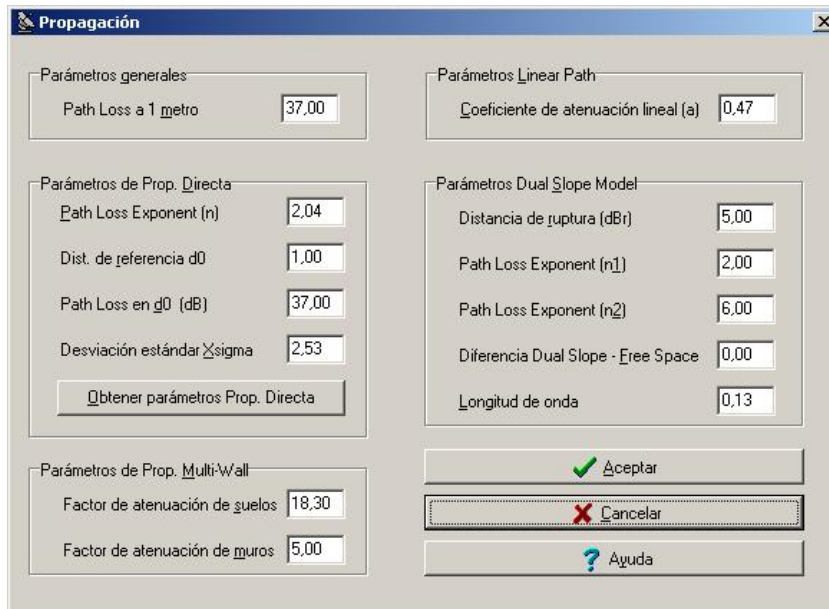


Figura 70 Configuración de los parámetros de propagación

En el caso de los parámetros de propagación directa, se pueden introducir directamente los parámetros ya calculados, u obtenerlos de las medidas tomadas en la calibración del modelo. Se calculan a partir de las medidas de campo almacenadas en un fichero de texto en el que aparecen en cada fila, pares: distancia (metros)-pathLoss (dBm). Y el prototipo realiza los cálculos para deducir los parámetros “*Path Loss Exponent (n)*” y “*Xsigma*”.

Los parámetros de radiosidad se configuran por separado, como se puede ver en la *Figura 71*.

El “*Área máxima de superficie*” condiciona el número de triángulos en los que va a descomponerse cada superficie para que sea considerada como un emisor de energía. A mayor número de triángulos (área máxima más pequeña) el punto central del triángulo, que es desde donde va a radiarse la energía, es más representativo del total, y el resultado será más fiable. Sin embargo, el coste computacional aumenta,

por lo que los cálculos serán más lentos. Como norma general, se debería empezar a realizar los cálculos con áreas grandes, para situar los puntos de acceso aproximadamente; y posteriormente comprobar la ubicación con superficies más pequeñas.

El “*Factor de energía total*” indica el porcentaje de energía recibida por un triángulo que va a ser transmitida por su punto central.

La “*Convergencia*” representa el factor de parada del algoritmo de radiosidad, indicando en dB la relación entre la potencia de la cara emisora y la energía reflejada inicial de la escena.

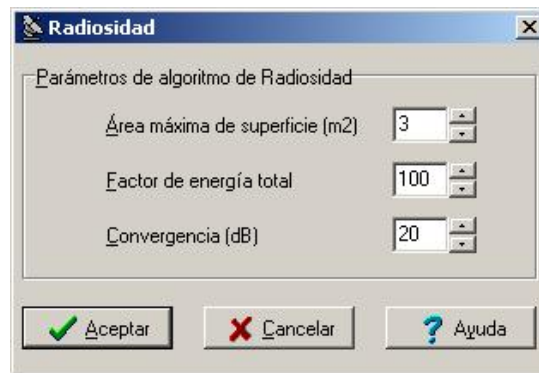


Figura 71 Configuración de parámetros de radiosidad

## 8.2.2 Configuración de la red sensorial

La red sensorial está formada por una malla de sensores situados a determinada altura dentro de cada planta, y van a ser los encargados de almacenar la intensidad de señal que les llega en cada uno de los modelos de propagación.

Como se puede ver en la *Figura 72*, se configuran la altura, el área que ocupan (longitud del lado del cuadrado, lo que indica la densidad de sensores), y el límite de señal para la representación gráfica.

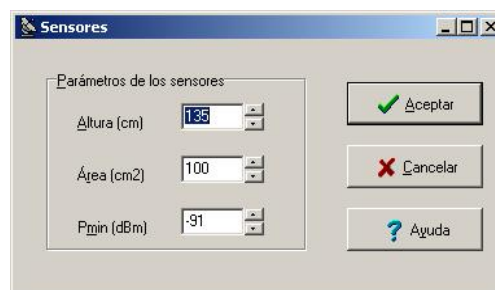


Figura 72 Configuración de los sensores

Los sensores se sitúan horizontalmente en cada planta, a una altura determinada, pero sólo uno en cada lugar. No es posible, en este prototipo, realizar en una única predicción los cálculos de cobertura a diferentes alturas dentro de cada

planta. En el caso de la *Figura 72*, se sitúan a 135 cm por ser la altura aproximada de toma de mediciones con una PDA con la que se hicieron las calibraciones y pruebas. Como norma general, la altura debería situarse a la que vayan a estar situados los receptores inalámbricos.

La densidad de sensores también influye en el tiempo de computación del algoritmo, por lo que, al igual que con la superficie de las caras emisoras, se debe empezar con una densidad baja, y finalmente, realizar comprobaciones con más sensores para ratificar los resultados.

La potencia mínima representable está fijada en lo que habitualmente es el límite de señal que permite la conexión inalámbrica (depende de los receptores).

La configuración de las características de propagación, la red sensorial, y la radiosidad, puede ser almacenada conjuntamente; de forma que pueda ser recuperada sin necesidad de introducir los datos de nuevo, e independientemente de las escenas cargadas.

### 8.2.3 Configuración de las propiedades de los materiales

Mientras no tengamos modelos del entorno (escenas) cargadas, no se pueden configurar más parámetros. Cuando se ha cargado al menos una escena, se puede pasar a establecer la atenuación y reflectividad de cada uno de los materiales que componen la escena, como puede verse en la *Figura 73* y la *Figura 74*.

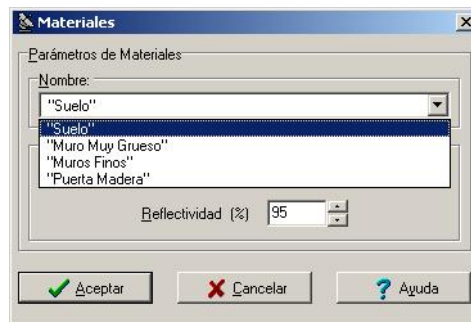


Figura 73 Selección del material a configurar

Se deberá configurar cada uno de los materiales que figuren en la escena o escenas cargadas, puesto que si no es así, el sistema no sabrá procesar las señales que les llegan y atraviesan; considerará que los materiales son transparentes a las señales y los resultados no serán correctos.



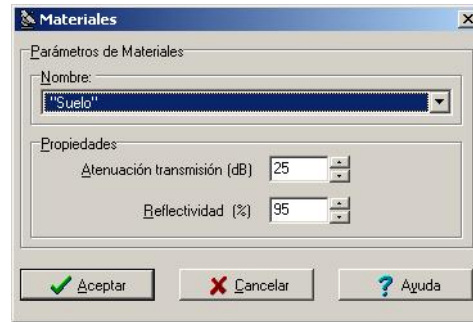


Figura 74 Configuración de parámetros de materiales

El número de materiales que componen la escena (o escenas) depende de el modelado que se realizó utilizando la herramienta 3D Studio.


De los parámetros de los materiales, al menos la “Atenuación” debe ser introducida en base a las medidas de campo tomadas. Se deberían distinguir tantos materiales como elementos claramente diferenciados existan en el entorno que se quiere estudiar. Es aconsejable que se agrupen los materiales de los muros en grupos representativos de características similares, es decir, que se establezcan unas pocas categorías, y se agrupen los muros en aquella que más se aproxime a las características reales.

La “reflectividad”, que representa el porcentaje de la energía no penetrada que es reflejada, no es una medida que se pueda obtener fácilmente de las medidas de campo, por lo que habrá que estimarla en base a los materiales de los que están compuestos los muros.

La configuración de materiales se almacena junto a los resultados cuando se guarda una simulación completa.

Cada vez que se hace una modificación que implique que se cambian los parámetros utilizados para calcular la emisión, se anulan todos los cálculos de propagación realizados, y hay que recalcularlos. Por ejemplo, una modificación en los parámetros de los materiales, supone que los cálculos previos no son válidos. Si se desean guardar los resultados actuales, hay que hacerlo antes de modificar nada.

#### 8.2.4 Instalación de puntos de acceso

La información que nos falta para poder comenzar con las simulaciones es la situación de los puntos de acceso. Se puede hacer desde el menú *Planificación* (Figura 75), o desde los iconos de acceso directo () de la barra de herramientas.

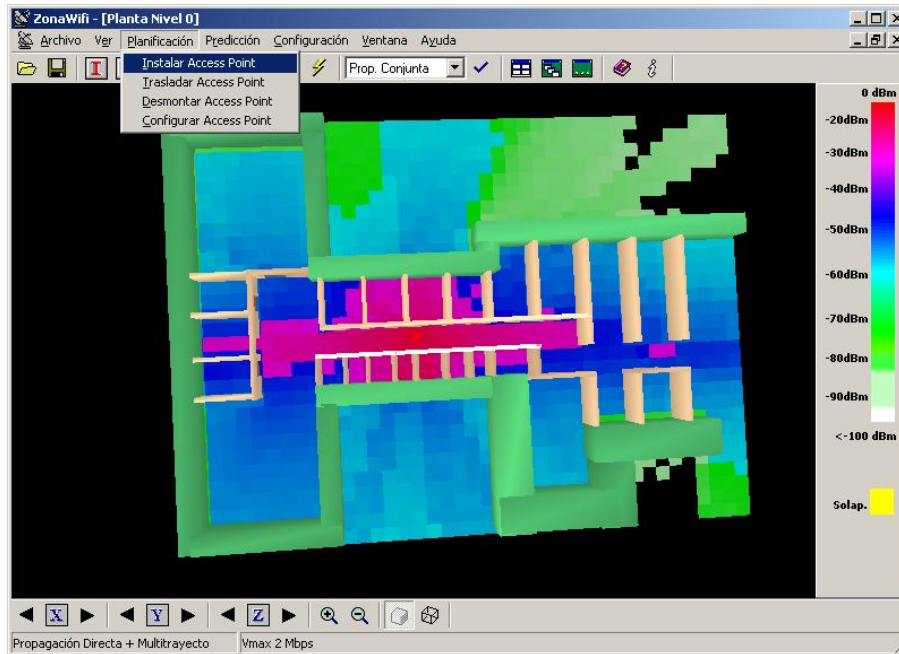


Figura 75 Menú de Planificación

Un punto de acceso se sitúa en unas coordenadas X, Y, Z (Figura 76) y tiene un nombre asignado que, si no se indica otro, será “Access Point” seguido de un número correlativo. Cada punto de acceso se va a representar en las escenas como un cubo rojo de 25 cm de lado.

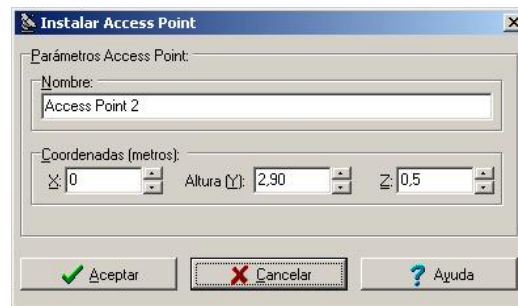


Figura 76 Instalación de un Punto de Acceso

Si no se configura nada más, se considerará que el punto de acceso emite isotrópicamente, es decir, igual en todas direcciones. La configuración del punto de acceso permite especificar el comportamiento real del punto de acceso, posiblemente acorde con las especificaciones del fabricante.

Se pueden configurar (Figura 77): la potencia de emisión (20 dBm se corresponden con el máximo permitido en España 100 mW, y es la configuración habitual por defecto de los puntos de acceso), la ganancia de la antena, la directividad horizontal y vertical para la parte frontal y trasera. Y por lo tanto, también hay que especificar hacia dónde está orientado el punto de acceso (Figura 79).

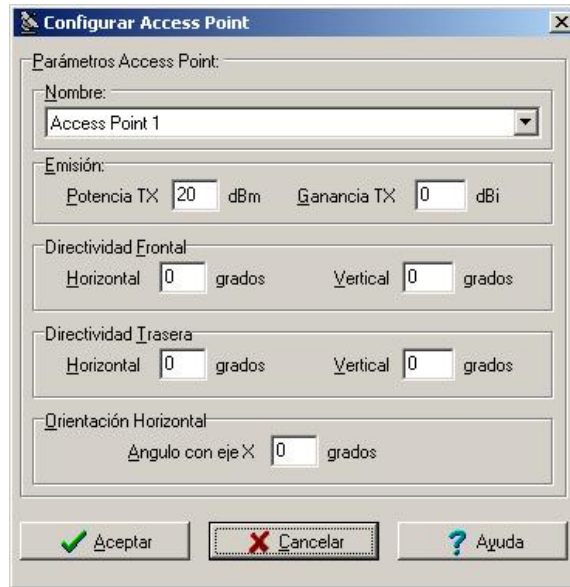


Figura 77 Configuración de un Punto de Acceso

Cada uno de los ángulos puede ir desde 0° hasta 90°, y son simétricos respecto a la normal al plano como puede apreciarse en la *Figura 78*. Con la configuración mostrada en la *Figura 77*, el punto de acceso emite igual en todas direcciones.

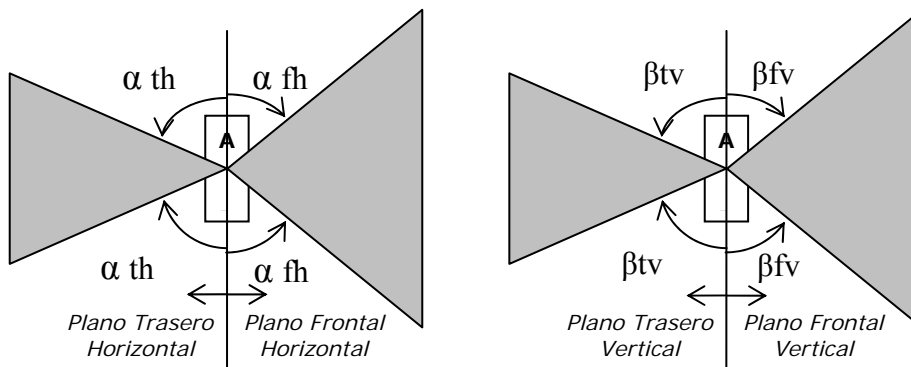


Figura 78 Configuración de los ángulos de emisión de un punto de acceso

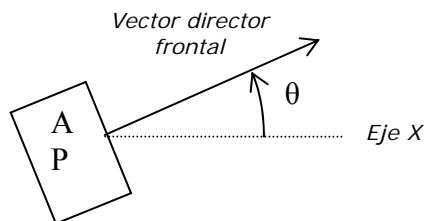


Figura 79 Configuración de la orientación de un punto de acceso

Una vez instalado un punto de acceso, puede desplazarse por la escena cambiando sus coordenadas, hasta llevarlo al sitio que se desee, sin necesidad de calcular las coordenadas previamente; ya que el prototipo va actualizando en tiempo real, la posición en la pantalla gráfica.

Por supuesto, también se pueden eliminar puntos de acceso seleccionándolos de la lista desplegable que muestra los puntos de acceso instalados (Figura 80).

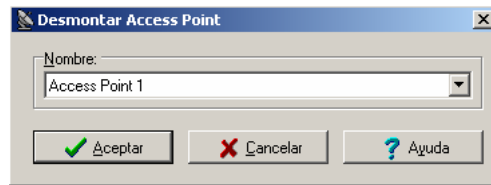
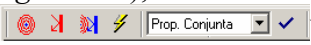


Figura 80 Eliminación de un Punto de Acceso

Al igual que con los parámetros de configuración de la propagación, de los sensores o de los materiales, cada vez que se hace una modificación que implique que se cambian las condiciones de emisión, se anulan todos los cálculos de propagación realizados.

### 8.2.5 Realización de simulaciones

En este momento, se pueden realizar las predicciones de cobertura con cada uno de los modelos de propagación o con todos. Se puede hacer desde el menú *Predicción* (Figura 81), o desde los botones y desplegables de la barra de herramientas (  )

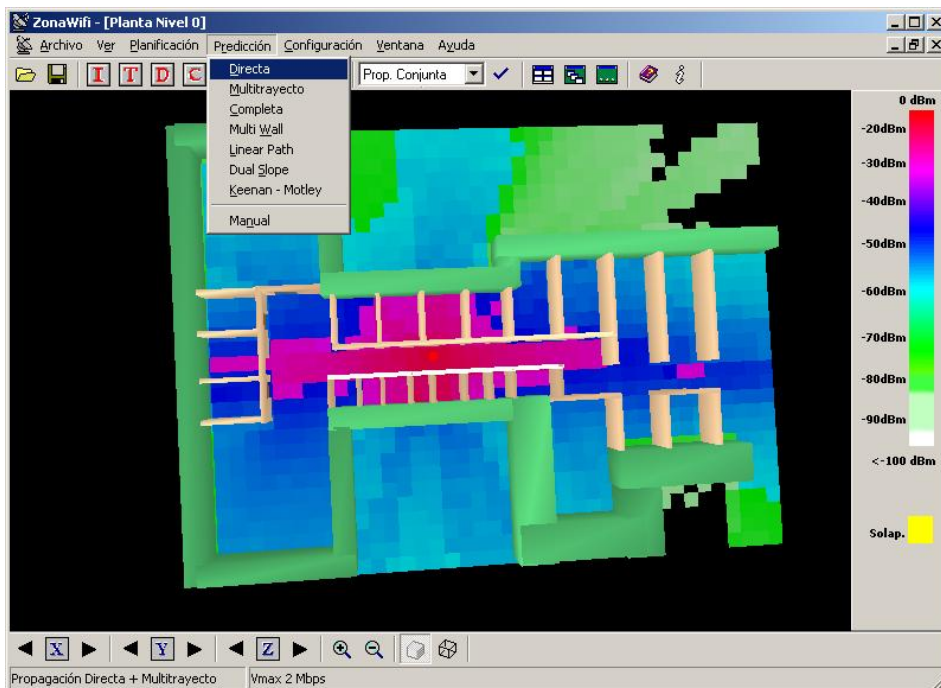


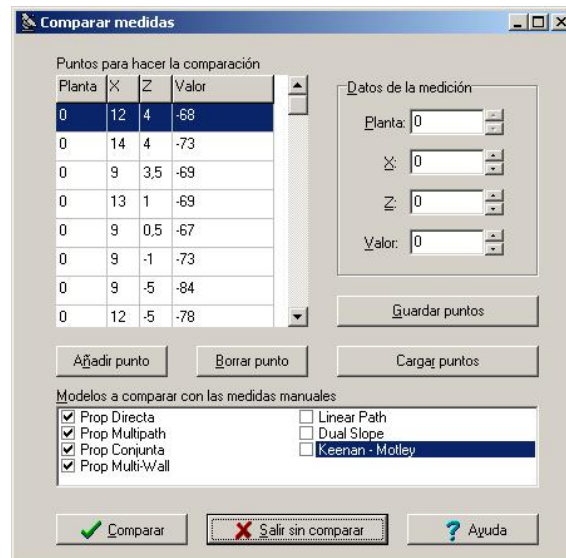
Figura 81 Menú de Predicción

En el prototipo se han implementado, además del método de propagación objeto de esta tesis, otros modelos de propagación, con el objetivo de realizar análisis comparativo de los resultados. Además se incluye la posibilidad de integrar en el prototipo medidas de campo realizadas, es decir valores reales medidos en el entorno (seleccionando la opción *Manual*) para compararlas con los resultados de las predicciones.

Si selecciona la opción *Manual*, se va a abrir una ventana (*Figura 82*) que nos permite introducir los puntos (coordenadas) con el valor medido de señal (en dBm). Se puede hacer de forma individual, o importarlos de un fichero de texto en el que se almacenen separados por espacios o tabuladores, la planta, las coordenadas X y Z del punto, y el resultado de la medición en ese punto (uno por línea).

*Planta CoordX odell ValorEnSensor*

Los puntos introducidos manualmente pueden exportarse a un fichero de texto con el formato adecuado para volver a importarlos posteriormente.



**Figura 82** Introducción de medidas de campo de cobertura

Si se realiza la comparación (botón *Comparar*), los valores introducidos se almacenan en una hoja de cálculo, o en un documento html (*Figura 83*), junto a los valores de predicción de los modelos de predicción marcados en la ventana, para los mismos sensores en los que existen datos manuales de cobertura. Sólo permitirá marcar aquellos modelos en los que se haya realizado la predicción previamente.

Planta	X	Z	Prop. Directa	Prop. Multipath	Prop. Conjunta	Prop. Multi-Wall	Manual
0	12	4	-59,76	-58,28	-55,95	-84,31	-68
0	14	4	-66,96	-58,04	-57,52	-97,49	-73
0	9	0,5	-33,86	-37,68	-32,35	-33,47	-67
0	9	-1	-33,90	-37,23	-32,24	-33,51	-73
0	8	0,5	-34,88	-37,43	-32,96	-32,51	-55
0	6	0,5	-31,55	-35,50	-30,08	-30,23	-56
0	3,5	0,5	-26,49	-28,15	-24,23	-25,27	-38
0	9	7	-74,88	-60,21	-60,06	-71,45	-77
0	-5	0,5	-29,29	-31,61	-27,29	-28,01	-39
0	-11	0,5	-36,13	-39,15	-34,38	-34,72	-57
0	-11	3	-63,49	-54,43	-53,92	-89,07	-70
0	-11	5	-66,03	-57,31	-56,76	-95,60	-75
0	-14	5	-69,85	-60,21	-59,76	-103,38	-83
0	-13,5	1	-60,31	-50,94	-50,47	-84,85	-64
0	-15	-5	-72,34	-55,02	-54,94	-109,86	-73
0	-10	-4	-64,92	-56,03	-55,50	-100,51	-81
0	-10	-6	-106,62	-59,68	-59,68	-107,20	-77
0	-10	-8	-109,46	-60,85	-60,85	-114,02	-88

Figura 83 Comparativa de resultados con medidas de campo como documento html

Si no se realiza la comparación (botón *Salir sin comparar*), se almacenan los datos en la aplicación para permitir la visualización gráfica de los datos introducidos manualmente.

## 8.2.6 Visualización de resultados

Desde el menú *Ver* (Figura 84), se puede seleccionar el resultado del modelo de predicción que se desee visualizar. También se puede cambiar el modelo visualizado utilizando algunas teclas de acceso rápido.

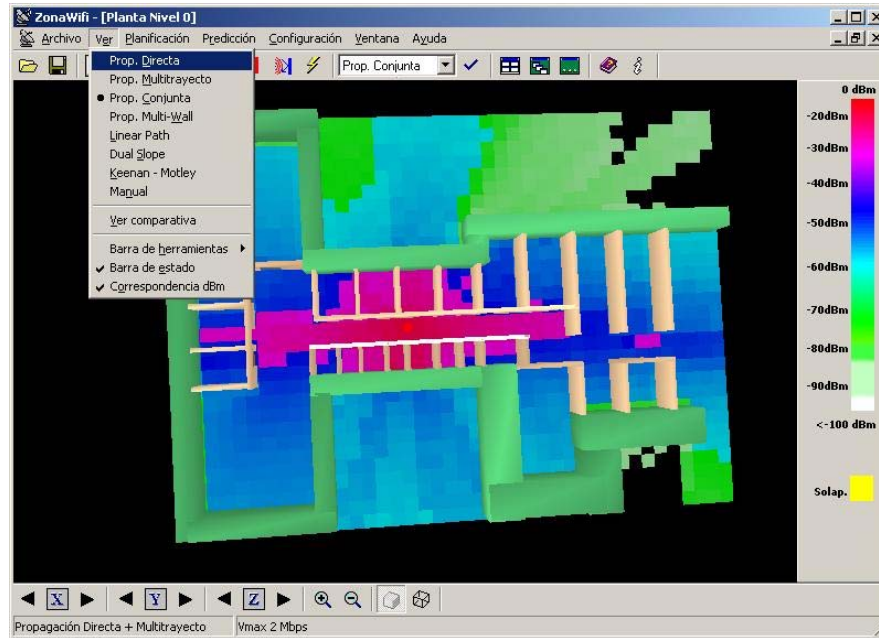
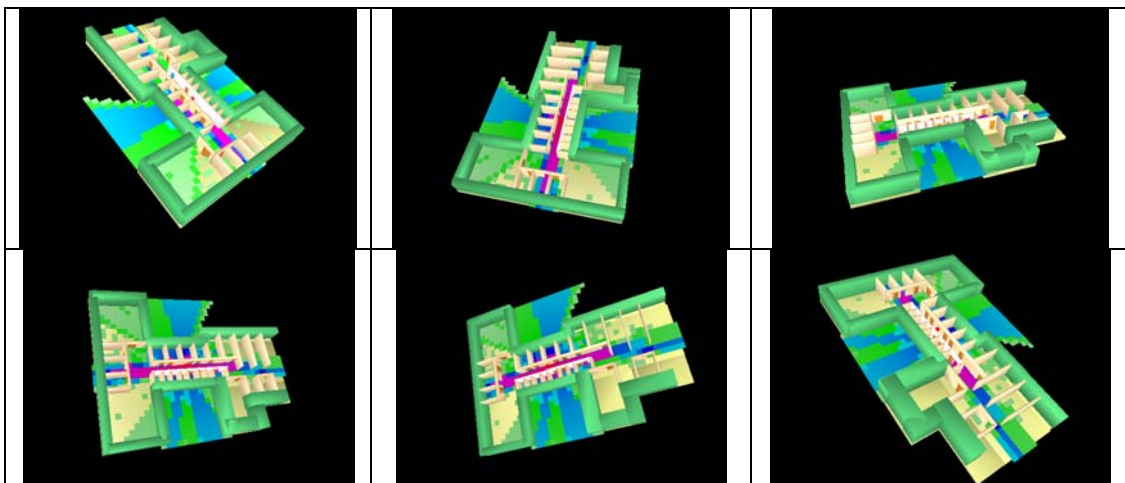


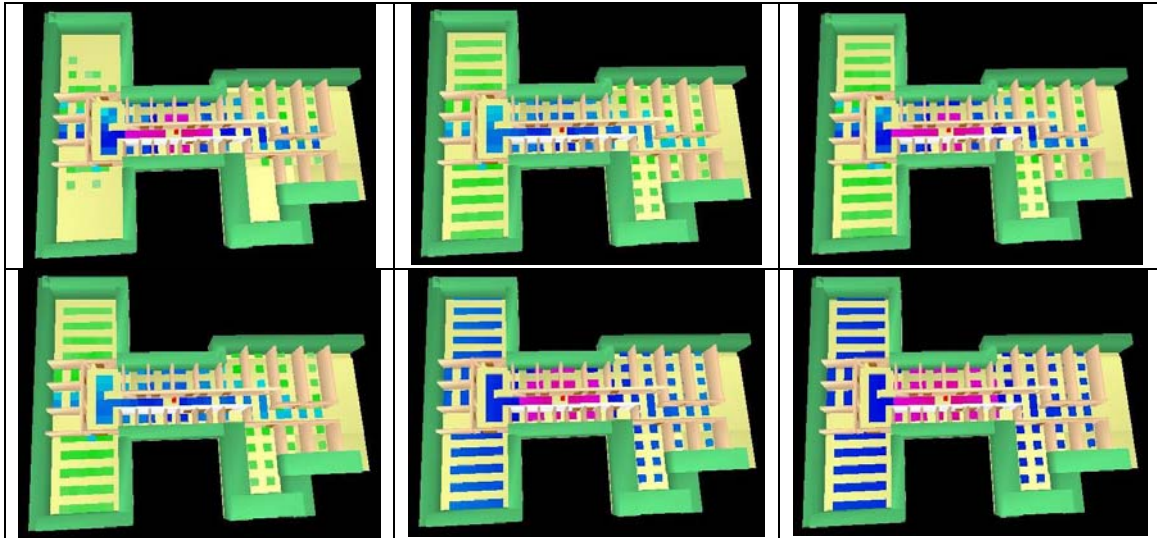
Figura 84 Menú Visualización

La imagen visualizada en cada momento, se puede guardar como fichero de mapa de bits desde el menú *Archivo* utilizando la opción *Guardar como...*

El modelo geométrico es tridimensional, y puede variarse el punto de vista usando los botones a tal efecto en la barra de herramientas de visualización (en la parte inferior), o con teclas de acceso rápido; desplazando en cualquier dirección, acercando o alejando, y girando la imagen sobre cualquiera de los ejes X, Y o Z.



Si se activa la opción *Ver comparativa*, la imagen muestra los valores únicamente en los puntos en los que existen medidas de campo introducidos manualmente.



### 8.2.7 Análisis de resultados

Los resultados de la aplicación de los modelos de propagación al entorno tridimensional geométrico, pueden analizarse visualmente como hemos visto en el apartado anterior, o analizarse a partir de los datos exportados en ficheros. Los datos exportados, como hemos visto, pueden ser los de todos los sensores del entorno (según la densidad de sensores establecida) o únicamente los sensores de aquellos puntos en los que se tengan medidas de campo reales.

Si lo que se desea es encontrar una ubicación que satisfaga las necesidades de cobertura, puede ser suficiente con el análisis visual. Pero la decisión de situar los puntos de acceso en uno u otro lugar, se debe tomar por el usuario.

Si lo que se desea es buscar la ubicación óptima, serían necesarios sucesivos cálculos y modificaciones en la ubicación de los puntos de acceso; y la decisión de si es o no una ubicación óptima, también la debe tomar el usuario.

El prototipo ha sido diseñado para implementar y comprobar la bondad del modelo de propagación objeto de esta tesis; y la inclusión de otros modelos de propagación se ha realizado con objeto de poder comparar los resultados obtenidos.



# CAPÍTULO 9

## PRUEBAS TEÓRICAS

---

### 9.1 Memoria de las pruebas teóricas

Las pruebas del prototipo han tratado de contemplar un número suficiente de escenarios de utilización de modo que quede probado el correcto funcionamiento por un lado, y la coherencia de los resultados de simulación obtenidos por otro.

### 9.2 Casos de prueba teóricos

Los parámetros de configuración, salvo que se indique lo contrario, son:

- La potencia de emisión = 20 dBm
- $X_\theta = 2,53$
- $n = 2,04$

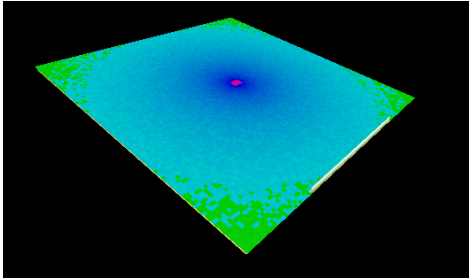
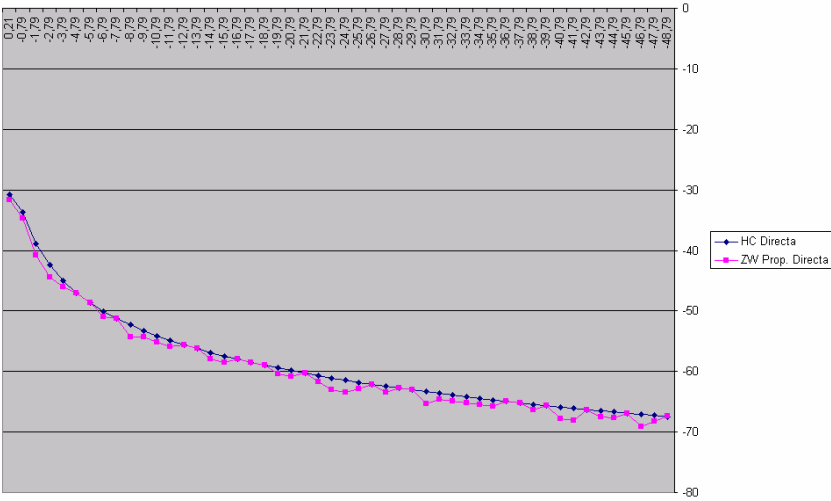
#### 9.2.1 Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos

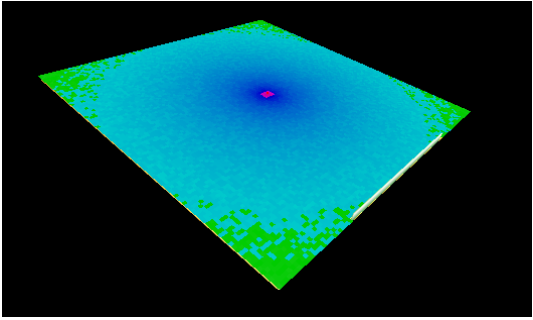
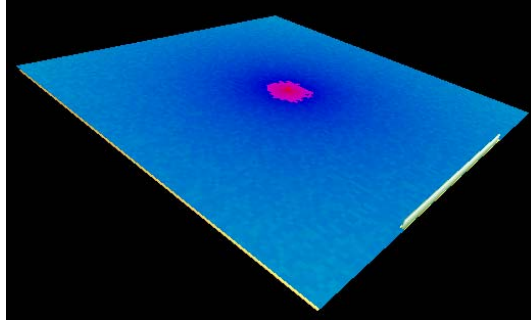
El escenario consiste en un suelo cuadrado de 100 metros de lado con un muro en uno de sus laterales de 50 metros. El punto de acceso se encuentra en el centro, a 2 metros de altura ( $X=0$ ,  $Y=2$ ,  $Z=0$ ), y emite con una potencia de 20 dBm de forma omnidireccional. El tamaño de parche para reflexiones es como máximo de  $10\text{m}^2$ .

Para realizar los cálculos teóricos de señal, se ha configurado una hoja de cálculo con las posiciones de todos los sensores, y todos los datos de configuración, y con las fórmulas de cálculo de señal en todos los modelos excepto en Multitrayecto (Radiosidad por refinamiento progresivo) por la complejidad que implica.

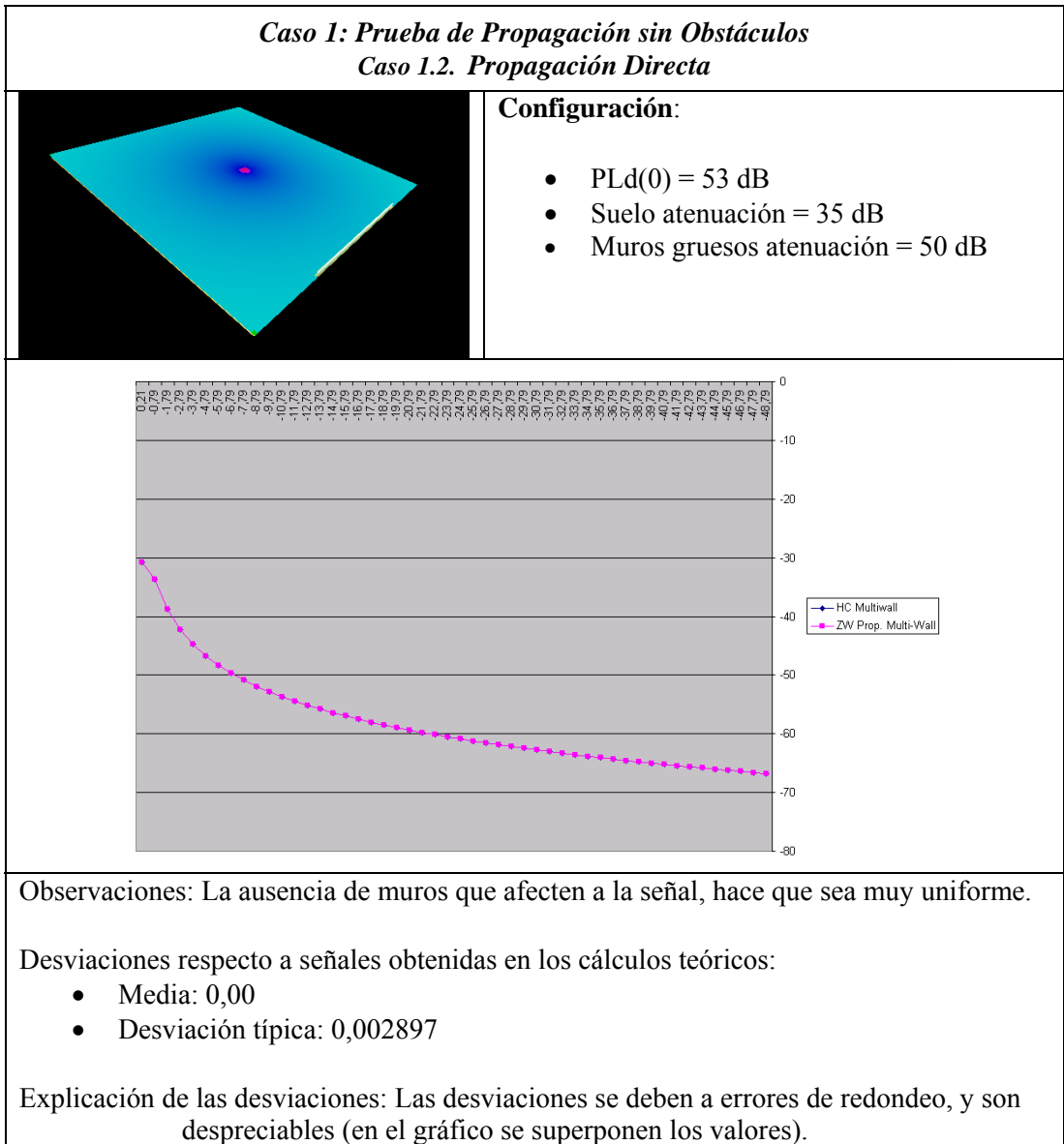
Algunos extractos de la hoja de cálculo se muestran en el *Anexo B*, apartado *Prueba de propagación sin obstáculos*. No se muestra completa debido a sus dimensiones (10201 filas, una por cada sensor)

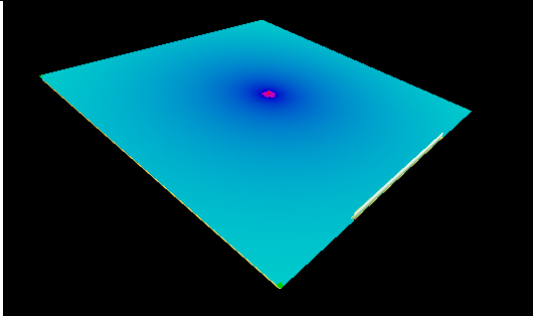
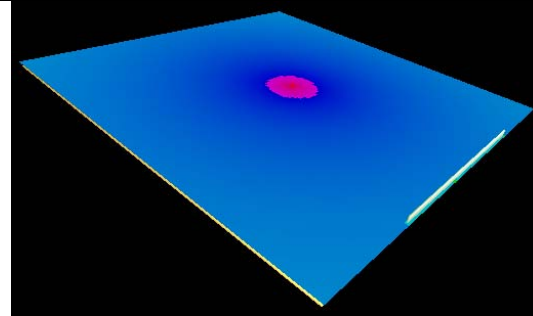
### 9.2.1.1 Propagación Directa

<b>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos</b> <b>Caso 1.1. Propagación Directa</b>	
	<p>Configuración:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PLd(0) = 53 dB</li> <li>• Path loss exponente (n) = 2.04</li> <li>• <math>X\sigma = 2.53</math></li> <li>• Suelo atenuación = 35 dB</li> <li>• Suelo reflectividad = 0%</li> <li>• Muros gruesos atenuación = 50 dB</li> <li>• Muros gruesos reflectividad = 100%</li> </ul>
	
<p><b>Observaciones:</b> Se muestra la dispersión producida por la variable aleatoria <math>X\sigma</math>. La variable <math>X\sigma</math> que se ha utilizado, está calculada con medidas de campo de la EUITIO, para entornos con obstáculos, por lo que no es adecuada para la propagación en el espacio libre sin obstáculos. Debería ser menor, y así daría menos dispersión de la señal.</p> <p>Desviaciones respecto a señales obtenidas en los cálculos teóricos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Media: 0,81</li> <li>• Desviación típica: 0,757035</li> </ul> <p>Explicación de las desviaciones: En los cálculos teóricos no se ha aplicado la variable aleatoria <math>X\sigma</math> a la pérdida de trayecto, por lo que hay diferencias de hasta <math>X\sigma</math> con los valores del prototipo que sí la aplica.</p>	

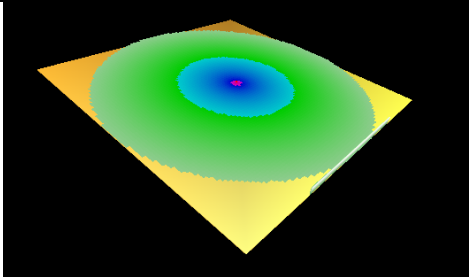
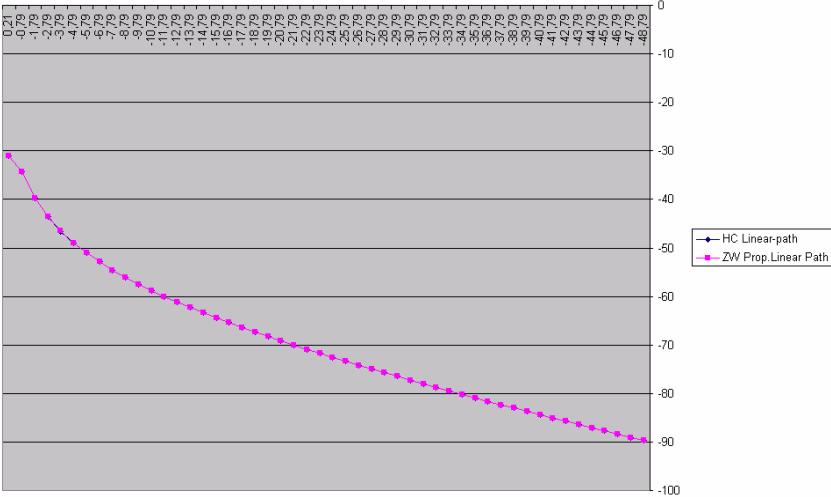
<b>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos</b> <b>Propagación Directa</b> <b>Comparativa con modificación de parámetros</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• PLd(0) = 53 dB</li><li>• Suelo atenuación = 35 dB</li><li>• Suelo reflectividad = 0 %</li><li>• Muros gruesos atenuación = 50 dB</li><li>• Muros gruesos reflectividad = 100 %</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• PLd(0) = 43 dB</li><li>• Suelo atenuación = 95 dB</li><li>• Suelo reflectividad = 95 %</li><li>• Muros gruesos atenuación = 95 dB</li><li>• Muros gruesos reflectividad = 95 %</li></ul>
	
Observaciones: El único parámetro que afecta a la señal en este caso es PLd(0), que al ser menor, hace que la señal recibida sea mayor.	

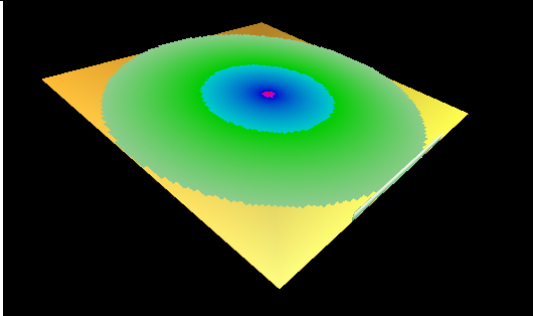
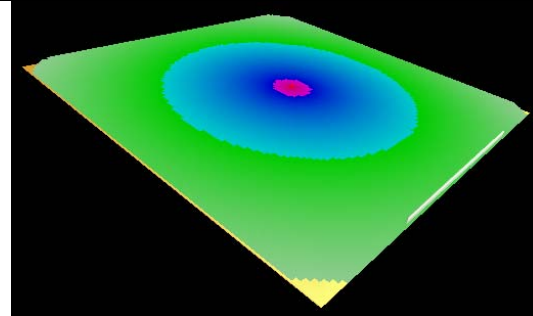
### 9.2.1.2 Propagación Multi-Wall



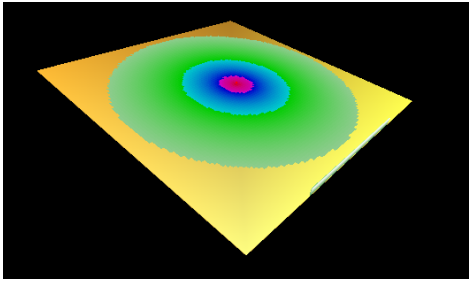
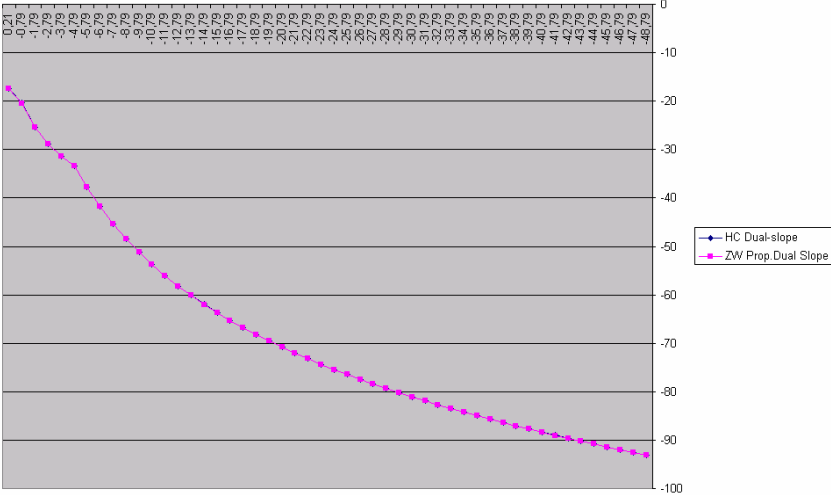
<i>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos Propagación Directa Comparativa con modificación de parámetros</i>	
• PLd(0) = 53 dB	• PLd(0) = 43 dB
	
Observaciones: La disminución del parámetro PLd(0), hace que la señal recibida sea mayor.	

### 9.2.1.3 Propagación Linear-Path

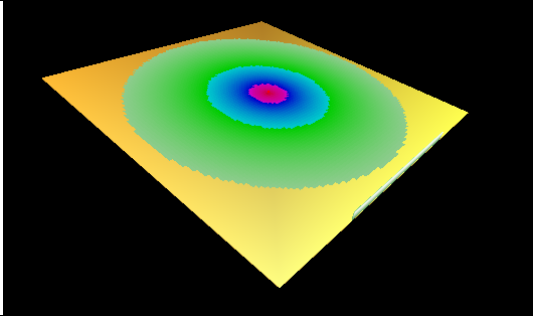
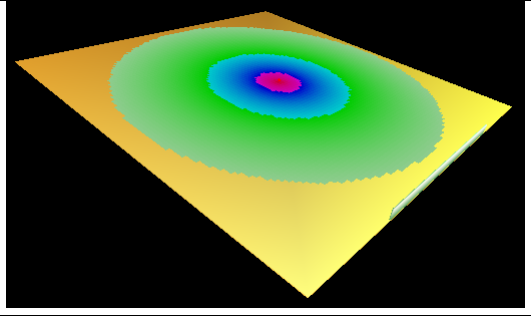
<b>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos</b> <b>Caso 1.3. Propagación Linear-Path</b>	
	<b>Configuración:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PLd(0) = 53 dB</li> <li>• Coeficiente de atenuación lineal (<math>\alpha</math>) = 0.47</li> </ul>
	
<p>Observaciones: el coeficiente de atenuación lineal tiene un valor típico de ambientes de oficina, y no es adecuado para espacios abiertos, por lo que la cobertura es menor. Habría que corregir el coeficiente de atenuación para espacios abiertos.</p> <p>Desviaciones respecto a señales obtenidas en los cálculos teóricos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Media: 0,00</li> <li>• Desviación típica: 0,002940</li> </ul> <p>Explicación de las desviaciones: Las desviaciones se deben a errores de redondeo, y son despreciables (en el gráfico se superponen los valores).</p>	

<i>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos Propagación Linear-Path Comparativa con modificación de parámetros</i>	
• PLd(0) = 53 dB	• PLd(0) = 43 dB
	
Observaciones: La disminución del parámetro PLd(0), hace que la señal recibida sea mayor.	

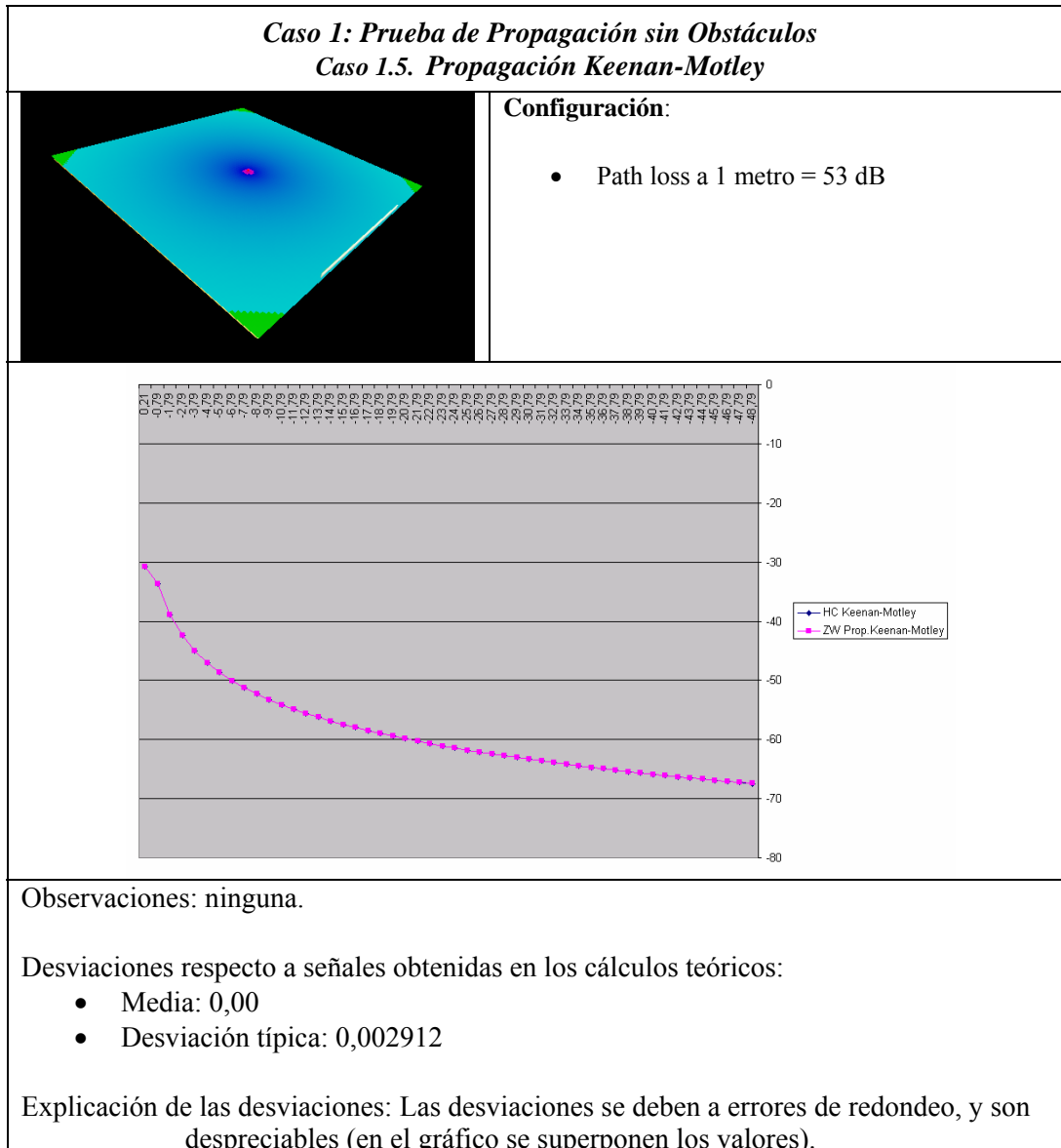
### 9.2.1.4 Propagación Dual-Slope

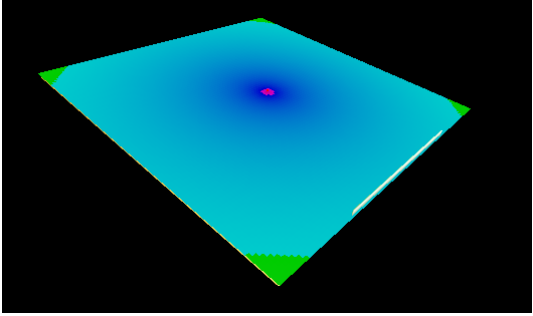
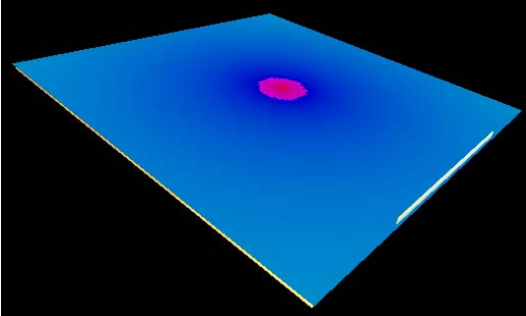
<i>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos</i> <i>Caso 1.4. Propagación Dual-Slope</i>	
	<p><b>Configuración:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>PLd(0) = 53 \text{ dB}</math></li> <li>• Distancia de ruptura <math>d_{Br} = 5</math></li> <li>• Path loss exponent (<math>n_1</math>) = 2</li> <li>• Path loss exponent (<math>n_2</math>) = 6</li> <li>• Longitud de onda = 0.13</li> </ul>
	
<p>Observaciones: Los parámetros establecidos en el modelo son parámetros típicos para ambientes de oficina, y no son adecuados para espacio libre. Habría que corregir los parámetros y adecuarlos a espacio sin obstáculos.</p> <p>Desviaciones respecto a señales obtenidas en los cálculos teóricos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Media: 0,00</li> <li>• Desviación típica: 0,002986</li> </ul> <p>Explicación de las desviaciones: Las desviaciones se deben a errores de redondeo, y son despreciables (en el gráfico se superponen los valores).</p>	



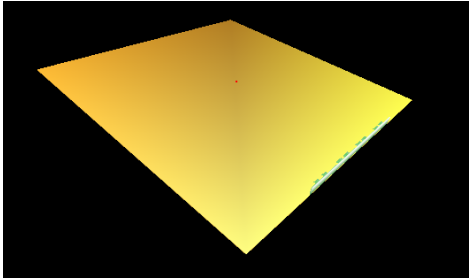
<i>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos Propagación Dual-Slope Comparativa con modificación de parámetros</i>	
• PLd(0) = 53 dB	• PLd(0) = 43 dB
	
Observaciones: Este modelo no depende del valor del parámetro PLd(0), por lo que no hay diferencias.	

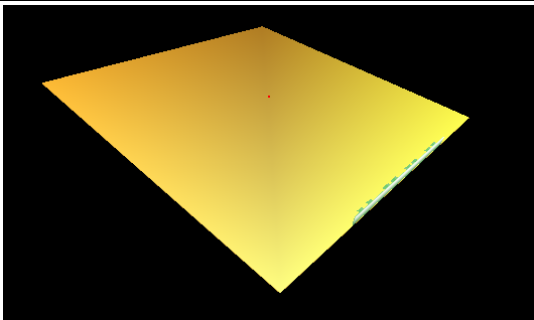
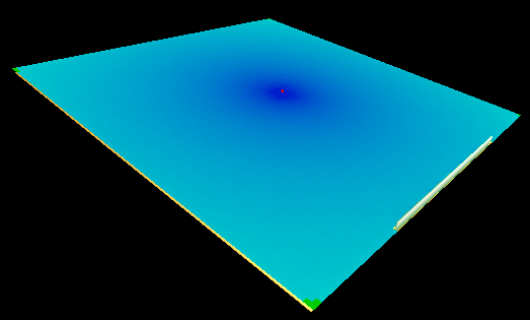
### 9.2.1.5 Propagación Keenan-Motley



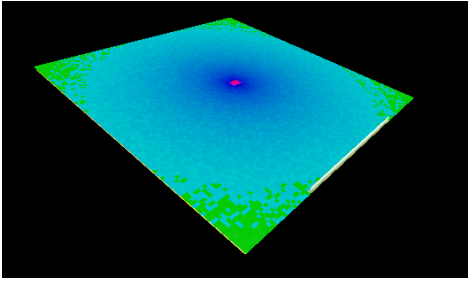
<b>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos</b> <b>Propagación Keenan-Motley</b> <b>Comparativa con modificación de parámetros</b>	
• PLd(0) = 53 dB	• PLd(0) = 43 dB
	
Observaciones: La disminución del parámetro PLd(0), hace que la señal recibida sea mayor.	

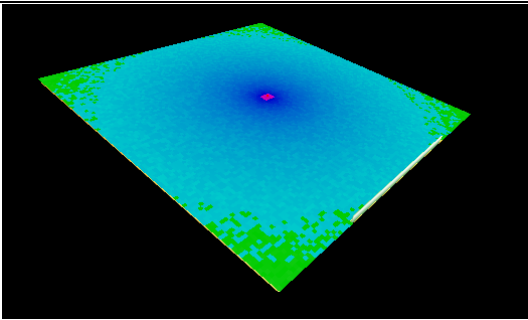
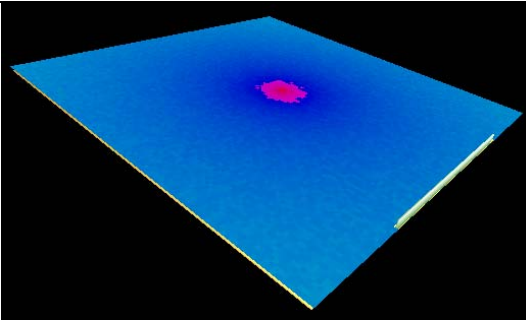
### 9.2.1.6 Propagación Multitrayecto

<i>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos</i> <i>Caso 1.6. Propagación Multitrayecto</i>	
	<p><b>Configuración:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PLd(0) = 53 dB</li> <li>• Path loss exponente (n) = 2.04</li> <li>• <math>X\sigma = 2.53</math></li> <li>• Suelo atenuación = 35 dB</li> <li>• Suelo reflectividad = 0%</li> <li>• Muros gruesos atenuación = 50 dB</li> <li>• Muros gruesos reflectividad = 100%</li> </ul>
<p>Observaciones: El que el suelo no refleje la señal, hace que las únicas señales detectadas sean las que se reflejan en el muro lateral, y como la señal que llega es muy baja, prácticamente no se detectan señales apreciables.</p> <p>No se han calculado intensidades de señal usando cálculos teóricos por las dificultades que supone la implementación.</p>	

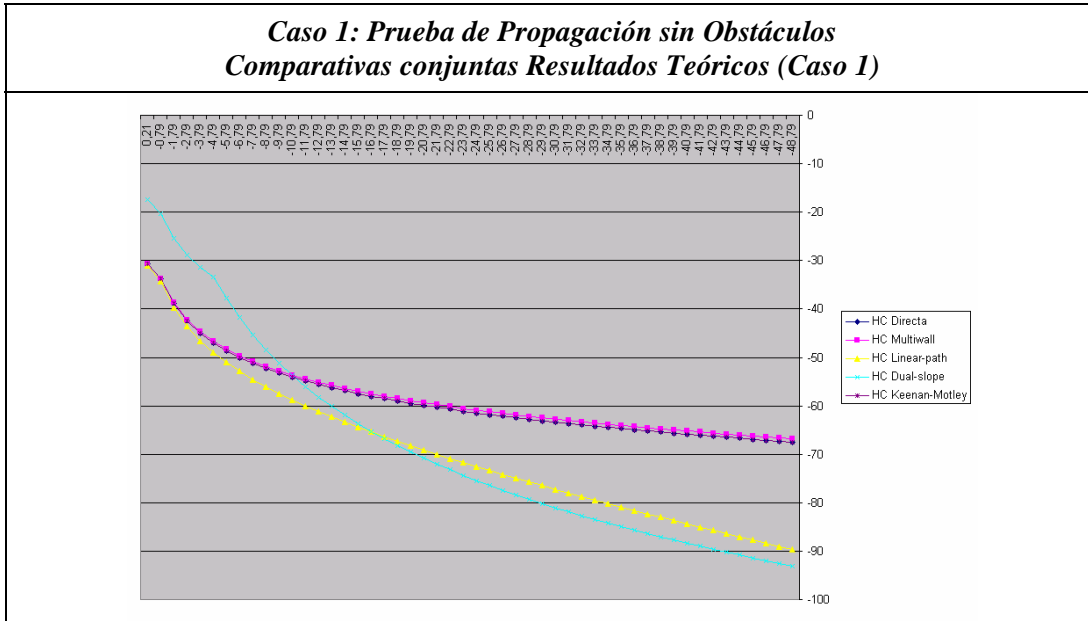
<i>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos</i> <i>Propagación Multitrayecto</i> <i>Comparativa con modificación de parámetros</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• PLd(0) = 53 dB</li> <li>• Suelo atenuación = 35 dB</li> <li>• Suelo reflectividad = 0 %</li> <li>• Muros gruesos atenuación = 50 dB</li> <li>• Muros gruesos reflectividad = 100 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PLd(0) = 43 dB</li> <li>• Suelo atenuación = 95 dB</li> <li>• Suelo reflectividad = 95 %</li> <li>• Muros gruesos atenuación = 95 dB</li> <li>• Muros gruesos reflectividad = 95 %</li> </ul>
	
<p>Observaciones: Al configurar el suelo con reflectividad 95%, la señal reflejada llega a todos los sensores.</p>	

### 9.2.1.7 Propagación Conjunta

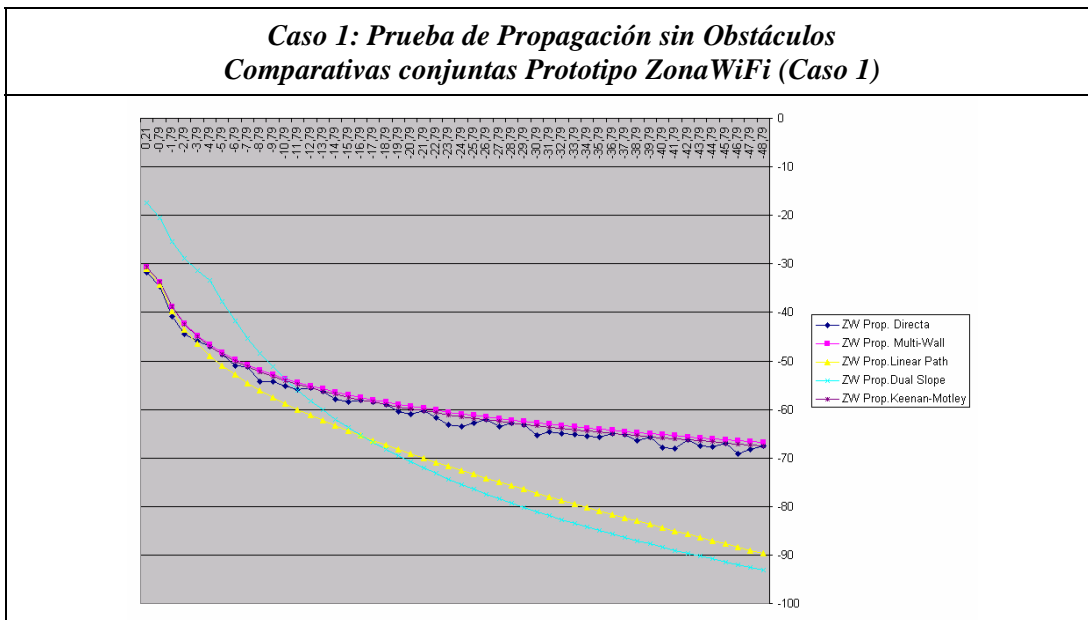
<i>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos</i> <i>Caso 1.7. Propagación Conjunta</i>	
	<b>Configuración:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Path loss exponente (<math>n</math>) = 2.04</li> <li>• <math>X\sigma = 2.53</math></li> <li>• Suelo atenuación = 35 dB</li> <li>• Suelo reflectividad = 0%</li> <li>• Muros gruesos atenuación = 50 dB</li> <li>• Muros gruesos reflectividad = 100%</li> </ul>
<p>Observaciones: Prácticamente es la misma señal que la propagación directa, porque la señal multitrayecto es muy poca.</p> <p>No se han calculado intensidades de señal usando los cálculos teóricos porque se utiliza la propagación multitrayecto que no se ha calculado.</p>	

<i>Caso 1: Prueba de Propagación sin Obstáculos</i> <i>Propagación Conjunta</i> <i>Comparativa con modificación de parámetros</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• PLd(0) = 53 dB</li> <li>• Suelo atenuación = 35 dB</li> <li>• Suelo reflectividad = 0 %</li> <li>• Muros gruesos atenuación = 50 dB</li> <li>• Muros gruesos reflectividad = 100 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PLd(0) = 43 dB</li> <li>• Suelo atenuación = 95 dB</li> <li>• Suelo reflectividad = 95 %</li> <li>• Muros gruesos atenuación = 95 dB</li> <li>• Muros gruesos reflectividad = 95 %</li> </ul>
	
<p>Observaciones: Al configurar el suelo con reflectividad 95%, la señal reflejada llega a todos los sensores.</p>	

### 9.2.1.8 Comparativas conjuntas Resultados Teóricos (Caso 1)



### 9.2.1.9 Comparativas conjuntas Prototipo ZonaWiFi (Caso 1)



## 9.2.2 Caso 2: Prueba de Propagación (claustro)

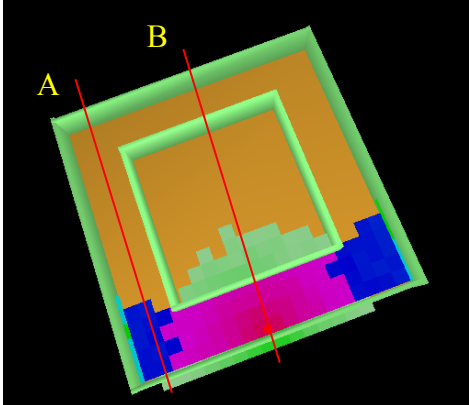
El escenario es un claustro formado únicamente por muros gruesos, y suelo. La configuración para todos los modelos del *Path loss a 1 metro* es 43 dB. El punto de acceso está situado en uno de los pasillos laterales a 2 metros de altura.

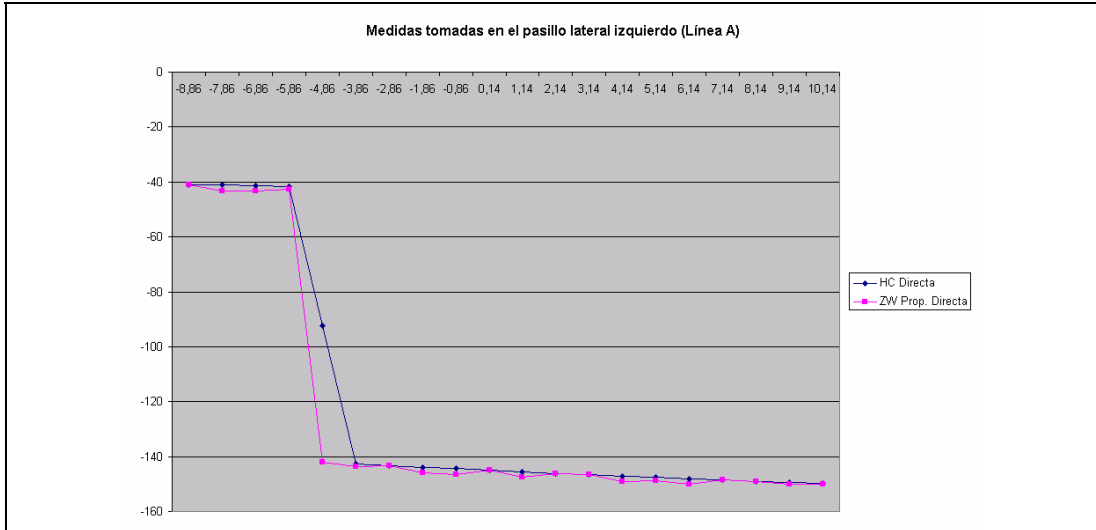
Para obtener los resultados teóricos se ha configurado una hoja de cálculo con las posiciones de todos los sensores, y todos los datos de configuración; y con las fórmulas de cálculo de señal en todos los modelos, excepto en Multitrayecto (Radiosidad por refinamiento progresivo) por la complejidad que implica.

Las comparaciones se han realizado en las líneas A y B indicadas en las imágenes que representan los casos más representativos en la influencia de los obstáculos y de sus características.

Los resultados teóricos calculados en una hoja de cálculo se muestran en la *Tabla 36*, en el *Anexo B*, apartado *Prueba de propagación (claustro)*.

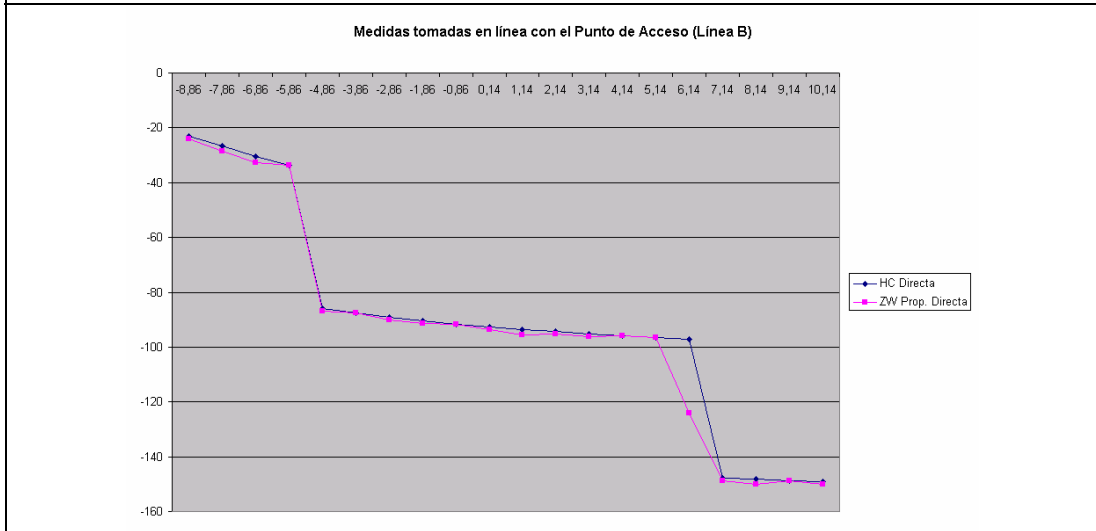
### 9.2.2.1 Propagación Directa

<b>Caso 2: Prueba de Propagación (claustro)</b> <b>Caso 2.1. Propagación Directa</b>	
	<b>Configuración:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Path loss exponente (n) = 2.04</li> <li>• <math>X\sigma = 2.53</math></li> <li>• Suelo atenuación = 35 dB</li> <li>• Suelo reflectividad = 100%</li> <li>• Muros gruesos atenuación = 50 dB</li> <li>• Muros gruesos reflectividad = 100%</li> </ul>
<p>Observaciones: La alta absorción del muro, hace que a la parte interior del claustro, no llegue casi señal; tampoco a los laterales y al fondo.</p> <p>Desviaciones respecto a señales teóricas obtenidas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Media: 0,78</li> <li>• Desviación típica: 0,7414</li> </ul> <p>Explicación de las desviaciones: En los cálculos teóricos no se ha aplicado la variable aleatoria <math>X\sigma</math> a la pérdida de trayecto, por lo que hay diferencias de hasta <math>X\sigma</math> con los valores del prototipo, que sí la aplica.</p>	



Observaciones de la Medición en la línea A:

- La diferencia de 50 dB en la coordenada  $Z = -4,86$ , se debe a que en los cálculos teóricos se ha considerado que si se atraviesa una esquina, sólo se atraviesa un muro; y en el prototipo ZonaWifi, considera que atraviesa 2 muros.
- Las diferencias son debidas a la variable aleatoria  $X_{\sigma}$ . En el prototipo ZonaWiFi puede haber un incremento de la pérdida por trayecto.



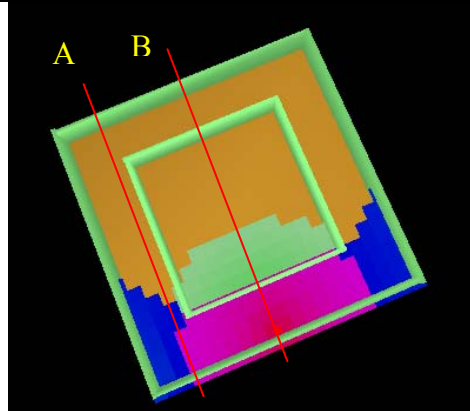
Medición en la línea B:

- La diferencia de 25 dB en la coordenada  $Z = 6,14$ , se debe a que en los cálculos teóricos se ha considerado que atraviesa un muro; y en el prototipo ZonaWifi el sensor coincide en el interior de un muro, por lo que sólo se considera la pérdida de entrar en el muro, pero no de salir. Se ajusta al modo de tener en cuenta la atenuación en los muros, que se ha realizado en el diseño del prototipo.



### 9.2.2.2 Propagación Multi-Wall

#### Caso 2: Prueba de Propagación (claustro) Caso 2.2. Propagación Multi-Wall



#### Configuración:

- Suelo atenuación = 35 dB
- Muros gruesos atenuación = 50 dB

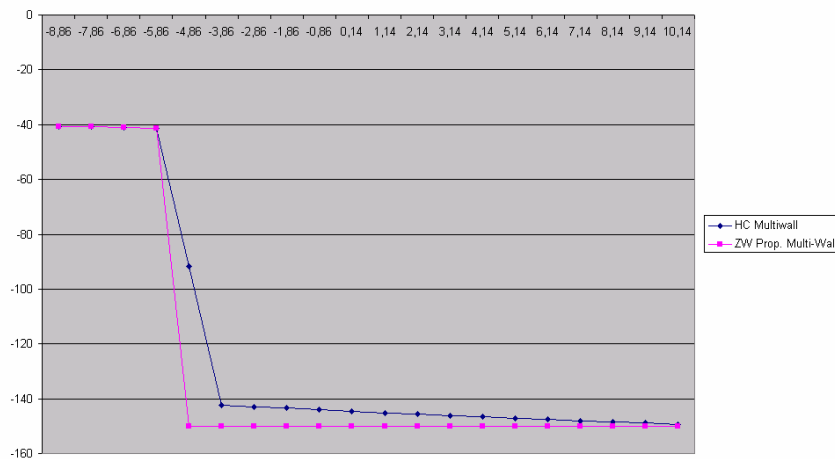
Observaciones: La alta absorción del muro, hace que a la parte interior del claustro, no llegue apenas señal; y a los laterales y al fondo, no llega nada (100 dB si atraviesa 2 muros)

Desviaciones respecto a señales teóricas obtenidas:

- Media: 0,00
- Desviación típica: 0,0037

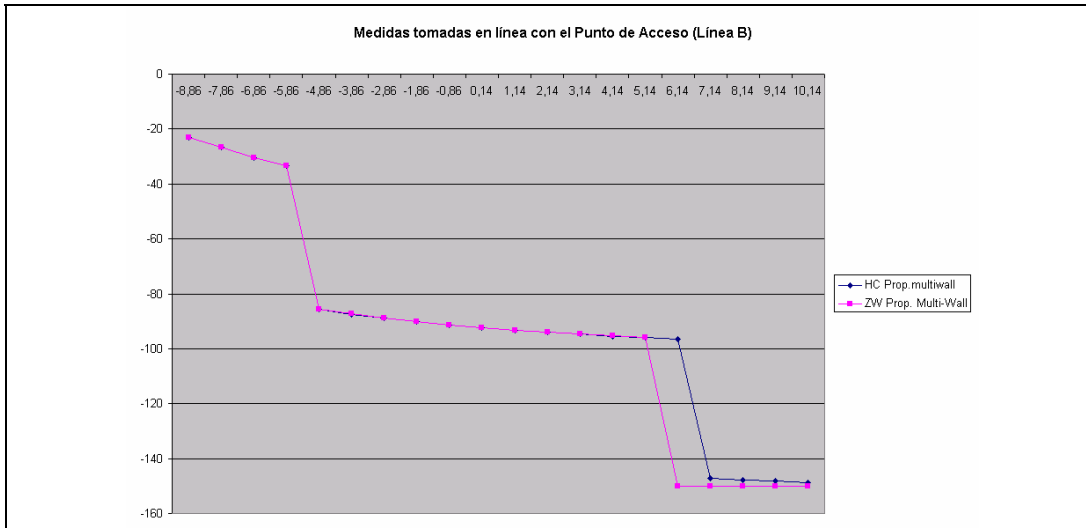
Explicación de las desviaciones: Las desviaciones se deben a errores de redondeo, y son despreciables.

Medidas tomadas en el pasillo lateral izquierdo (Línea A)



Observaciones de la Medición en la línea A:

- La diferencia de 50 dB en la coordenada Z = -4,86, se debe a que en los cálculos teóricos se ha considerado que si se atraviesa una esquina, sólo se atraviesa un muro; y en el prototipo ZonaWifi, considera que atraviesa 2 muros.

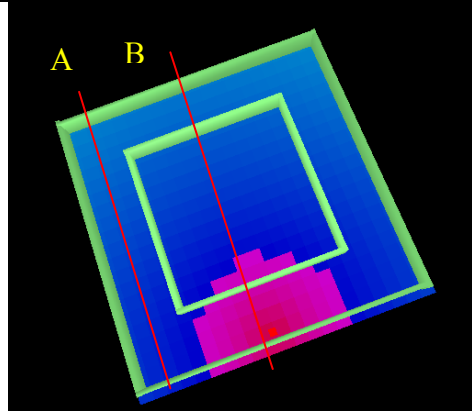


Medición en la línea B:

- La diferencia de 50 dB en la coordenada  $Z = 6,14$ , se debe a que en los cálculos teóricos se ha considerado que está a un lado de un muro, y en el prototipo ZonaWifi al otro lado.

### 9.2.2.3 Propagación Linear-Path

#### Caso 2: Prueba de Propagación (claustro) Caso 2.3. Propagación Linear-Path



#### Configuración:

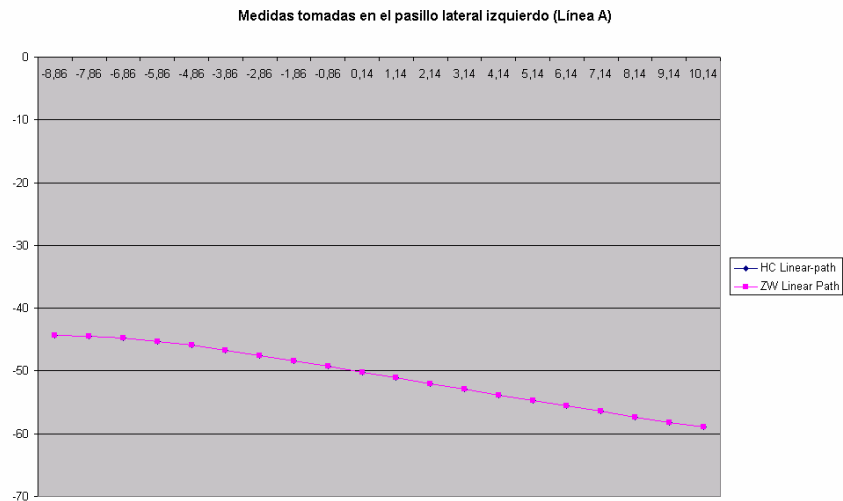
- Coeficiente de atenuación lineal (a) = 0.47

Observaciones: No se modifican las intensidades de señal detrás de los muros, ya que el modelo no los tiene en cuenta.

Desviaciones respecto a señales teóricas obtenidas:

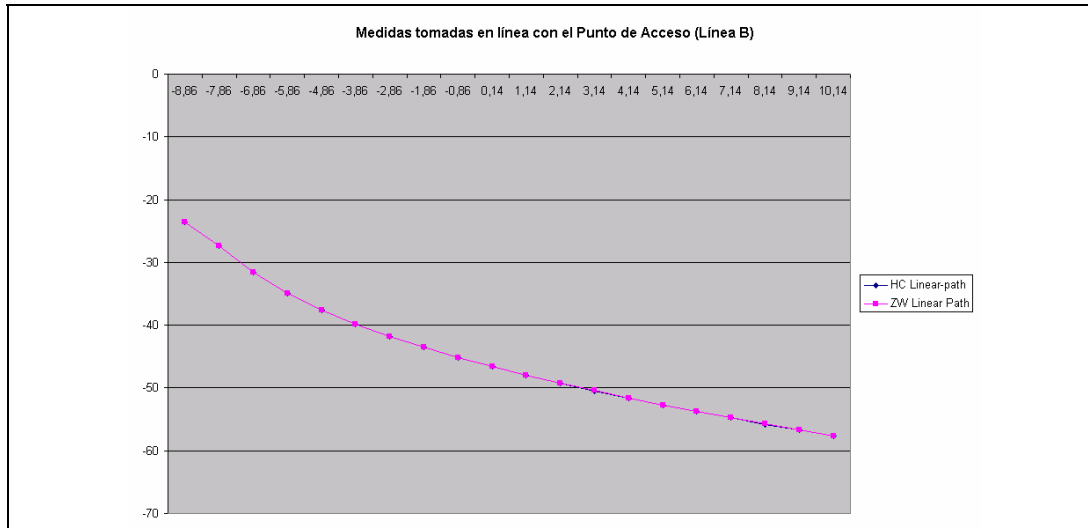
- Media: 0,00
- Desviación típica: 0,00555

Explicación de las desviaciones: Las desviaciones se deben a errores de redondeo, y son despreciables.



Observaciones de la Medición en la línea A:

- No hay diferencias apreciables.
- La curva es bastante plana ya que el punto más cercano se encuentra a 7,70 metros y el incremento de distancia entre puntos sucesivos y el punto de acceso se incrementa desde unos 20 cm en los primeros puntos, a unos 80 cm en los últimos puntos.
- Los datos de cobertura no son aceptables en este caso por no tener en cuenta la atenuación muy elevada de los muros.

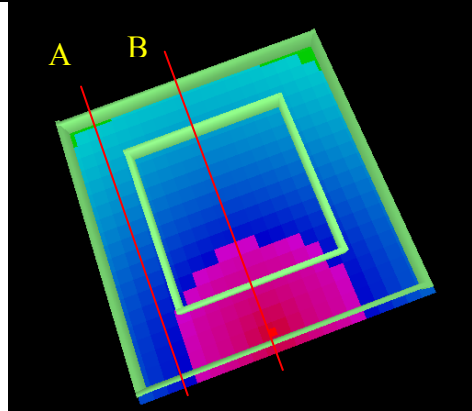


Medición en la línea B:

- No hay diferencias apreciables.
- Los datos de cobertura no son aceptables en este caso por no tener en cuenta la atenuación muy elevada de los muros.

### 9.2.2.4 Propagación Dual-Slope

#### Caso 2: Prueba de Propagación (claustro) Caso 2.4. Propagación Dual-Slope



#### Configuración:

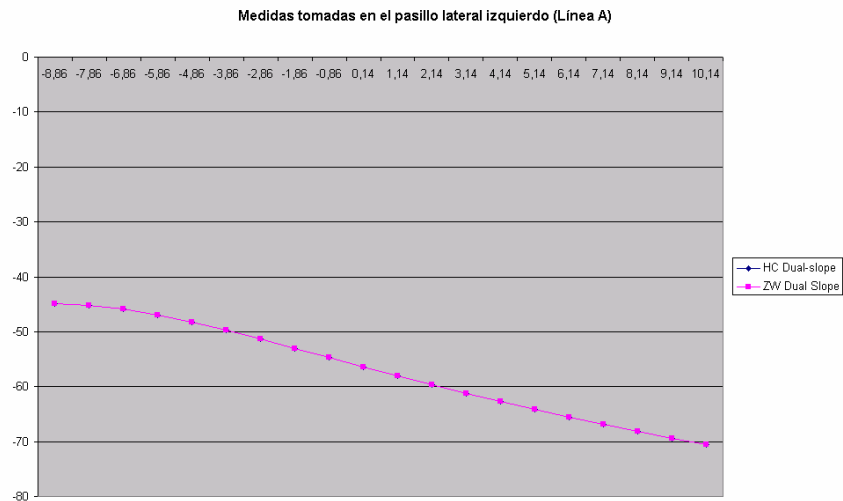
- Distancia de ruptura dBr = 5
- Path loss exponent (n1) = 2
- Path loss exponent (n2) = 6
- Longitud de onda = 0.13

Observaciones: No se modifican las intensidades de señal detrás de los muros, ya que el modelo no los tiene en cuenta.

Desviaciones respecto a señales teóricas obtenidas:

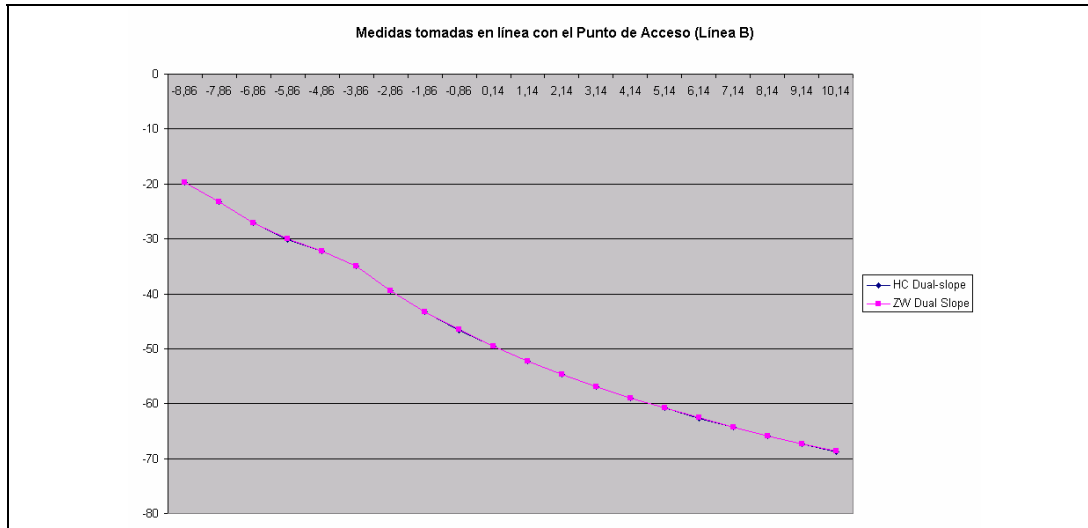
- Media: -0,01
- Desviación típica: 0,00645

Explicación de las desviaciones: Las desviaciones se deben a errores de redondeo, y son despreciables.



Observaciones de la Medición en la línea A:

- No hay datos reseñables, ya que no influyen los muros en los resultados.
- En la curva no influye el punto de ruptura, puesto que todos los puntos están más alejados que la distancia de ruptura (el punto más cercano se encuentra a 7,75 metros).
- Los datos de cobertura no son aceptables en este caso por no tener en cuenta la atenuación muy elevada de los muros.

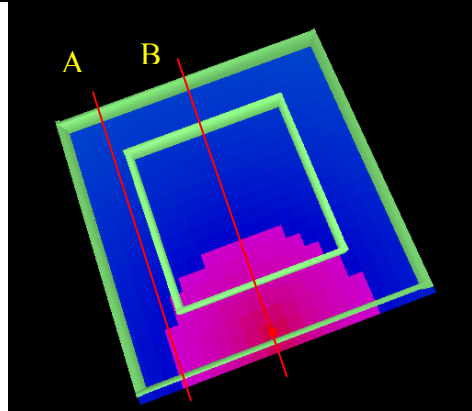


Medición en la línea B:

- Se aprecia el cambio de curva en a partir de la distancia de ruptura.
- Las diferencias de señal se deben a errores de redondeo y prácticamente no se aprecian.

### 9.2.2.5 Propagación Keenan-Motley

#### Caso 2: Prueba de Propagación (claustro) Caso 2.5. Propagación Keenan-Motley



#### Configuración:

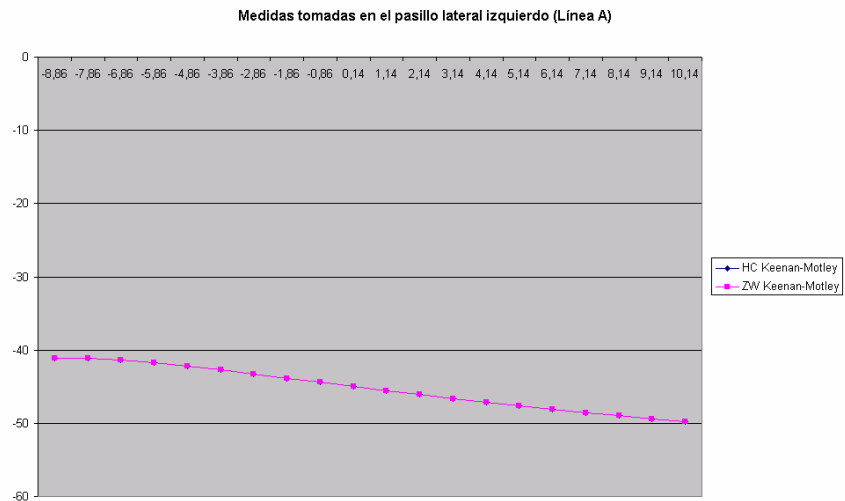
- Path loss a 1 metro = 43 dB

Observaciones: No se modifican las intensidades de señal detrás de los muros, ya que el modelo no los tiene en cuenta.

Desviaciones respecto a señales teóricas obtenidas:

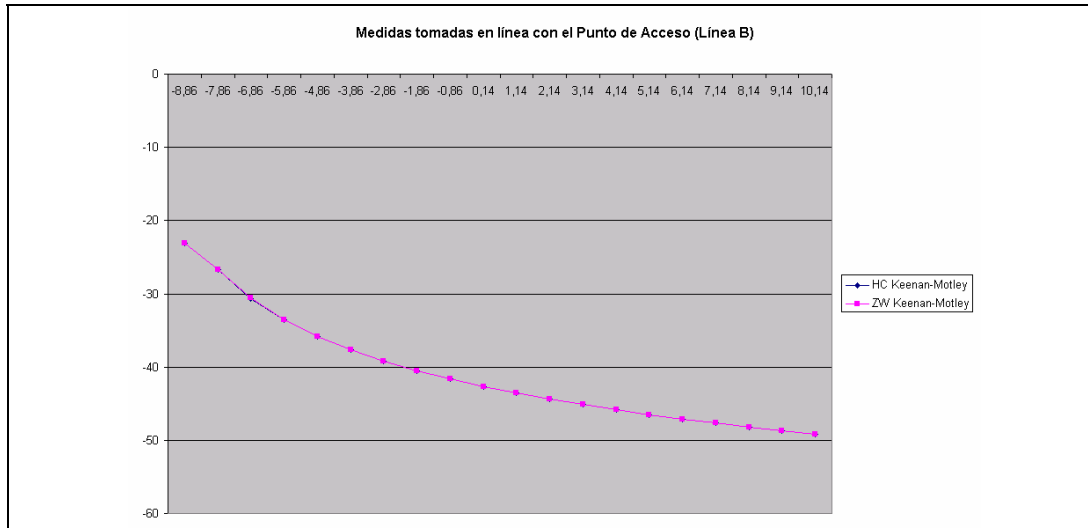
- Media: 0,00
- Desviación típica: 0,0049

Explicación de las desviaciones: Las desviaciones se deben a errores de redondeo, y son despreciables.



Observaciones de la Medición en la línea A:

- No hay datos reseñables, ya que no influyen los muros en los resultados.
- La curva es plana debido a la distancia inicial (7,70 metros) y al incremento entre puntos.
- Los datos de cobertura no son aceptables en este caso por no tener en cuenta la atenuación muy elevada de los muros.

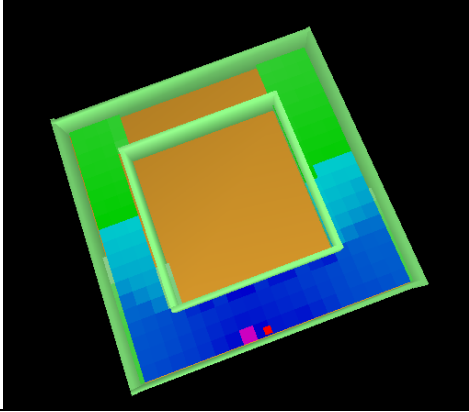


Medición en la línea B:

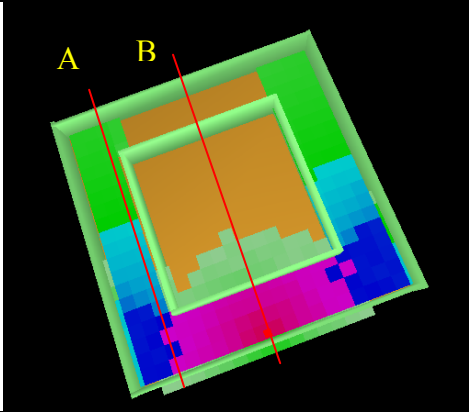
- Se aprecia el cambio de curva en a partir de la distancia de ruptura.
- Las diferencias de señal se deben a errores de redondeo y prácticamente no se aprecian.



### 9.2.2.6 Propagación Multitrayecto

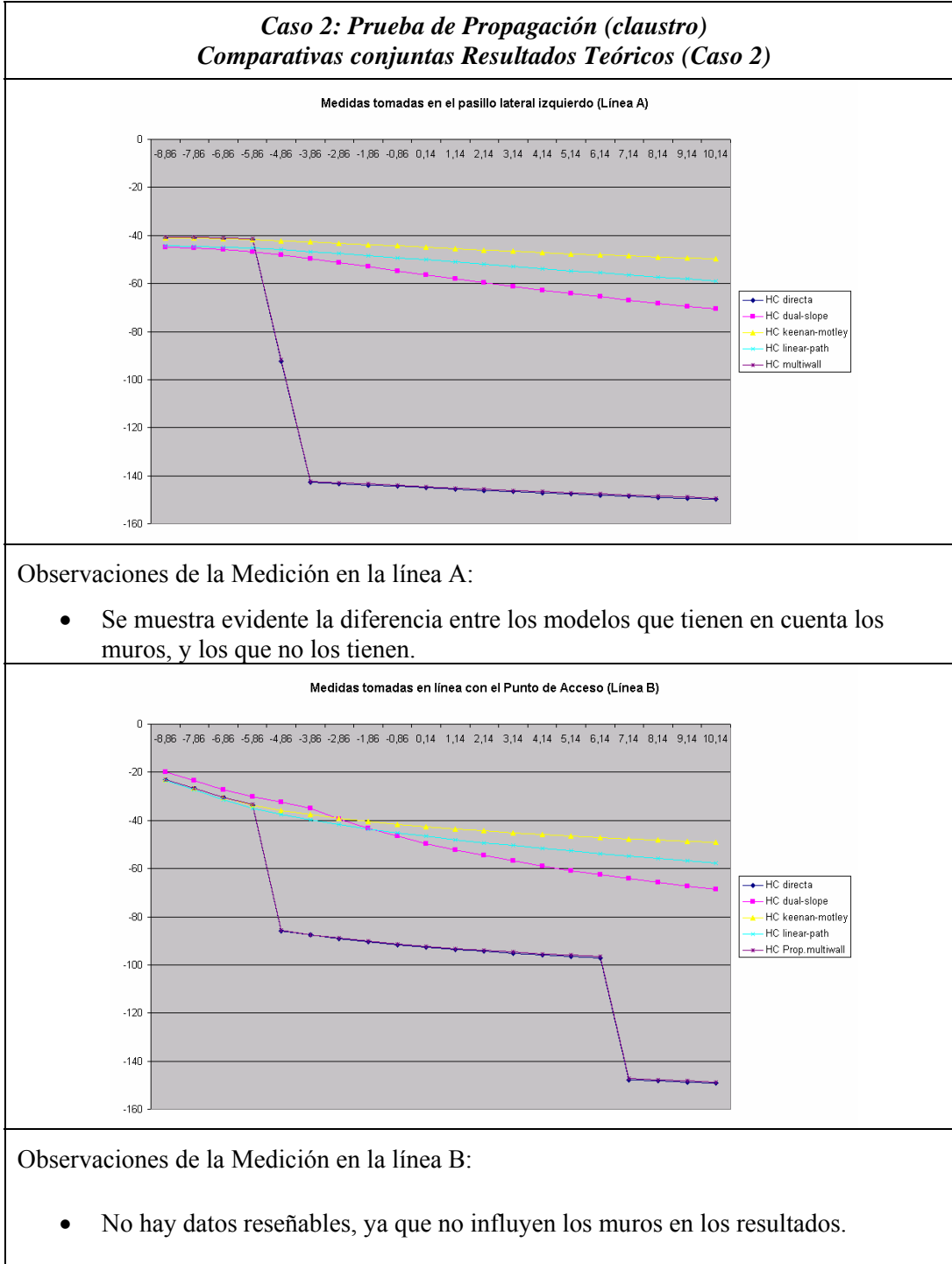
<i>Caso 2: Prueba de Propagación (claustro)</i> <i>Caso 2.6. Propagación Multitrayecto</i>	
	<p><b>Configuración:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Path loss exponente (n) = 2.04</li> <li>• <math>X\sigma = 2.53</math></li> <li>• Suelo atenuación = 35 dB</li> <li>• Suelo reflectividad = 100%</li> <li>• Muros gruesos atenuación = 50 dB</li> <li>• Muros gruesos reflectividad = 100%</li> </ul>
<p>Observaciones: La alta absorción del muro, hace que a la parte interior del claustro, no llegue señal suficiente para que sea reflejada. Sí llega señal por reflexiones de señal a los pasillos laterales y a los extremos del pasillo del fondo.</p> <p>No se han calculado intensidades de señal teórica en la hoja de cálculo por las dificultades que supone la implementación.</p>	

### 9.2.2.7 Propagación Conjunta

<i>Caso 2: Prueba de Propagación (claustro)</i> <i>Caso 2.7. Propagación Conjunta</i>	
	<p><b>Configuración:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Path loss exponente (n) = 2.04</li> <li>• <math>X\sigma = 2.53</math></li> <li>• Suelo atenuación = 35 dB</li> <li>• Suelo reflectividad = 100%</li> <li>• Muros gruesos atenuación = 50 dB</li> <li>• Muros gruesos reflectividad = 100%</li> </ul>
<p>Observaciones: La alta absorción del muro, hace que a la parte interior del claustro, no llegue señal suficiente para que sea reflejada. Sí llega señal por reflexiones a los pasillos laterales y a los extremos del pasillo del fondo. La señal que llega a la parte interior del muro corresponde únicamente a la señal aportada por propagación directa.</p> <p>No se han calculado intensidades de señal teóricas en la hoja de cálculo porque se utiliza la propagación multitrayecto que no se ha calculado.</p>	

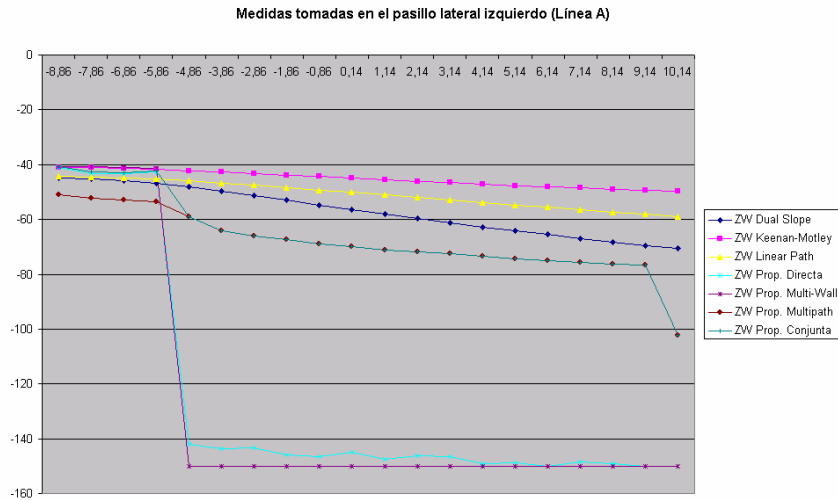
### 9.2.2.8 Comparativas conjuntas Resultados Teóricos (Caso 2)

Las medidas consideradas son las de las líneas A y B que se están considerando en el Caso 3.



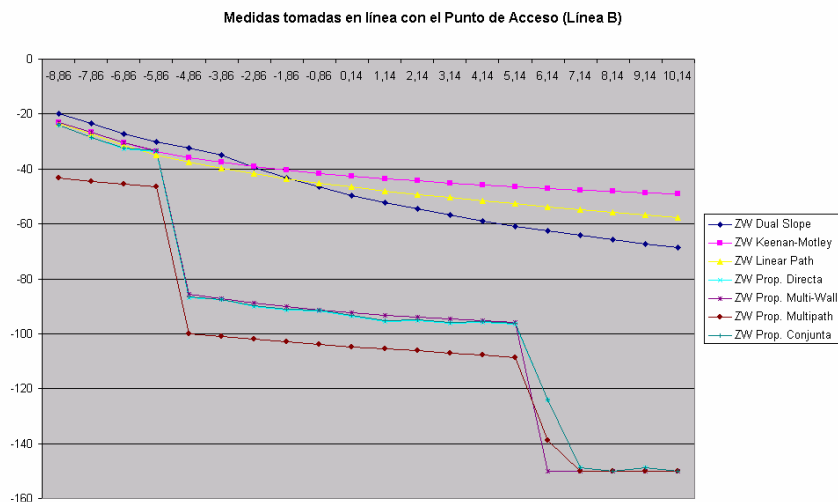
### 9.2.2.9 Comparativas conjuntas Prototipo ZonaWiFi (Caso 2)

#### Caso 2: Prueba de Propagación (claustro) Comparativas conjuntas Prototipo ZonaWiFi (Caso 2)



#### Observaciones de la Medición en la línea A:

- Se muestra que el modelo propuesto en la tesis se adapta a las mediciones teóricas en esta línea, precisamente, porque en el pasillo lateral sólo llegaría la señal reflejada.
- Los modelos que no tienen en cuenta los muros, considerarían implícitamente las señales reflejadas, pero las señales serían demasiado optimistas.



#### Observaciones de la Medición en la línea B:

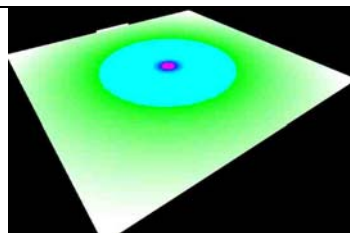
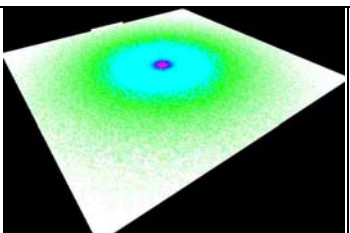
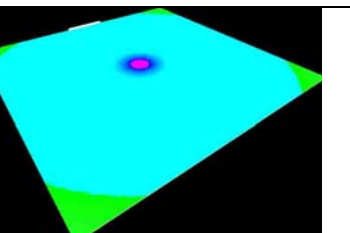
- Las señales de los modelos que no tienen en cuenta los muros, son demasiado optimistas, y señalan señales en sitios a los que no llegaría.
- El modelo propuesto en esta tesis se adapta bien a los comportamientos teóricos que se tendrían en un entorno de este tipo.

### 9.2.3 Caso 3: Pruebas del Modelo de Propagación Directa

En este apartado se realizan diversas pruebas con el método de propagación directa. Se prueban los efectos de cambios en los parámetros de configuración de propagación y de materiales.

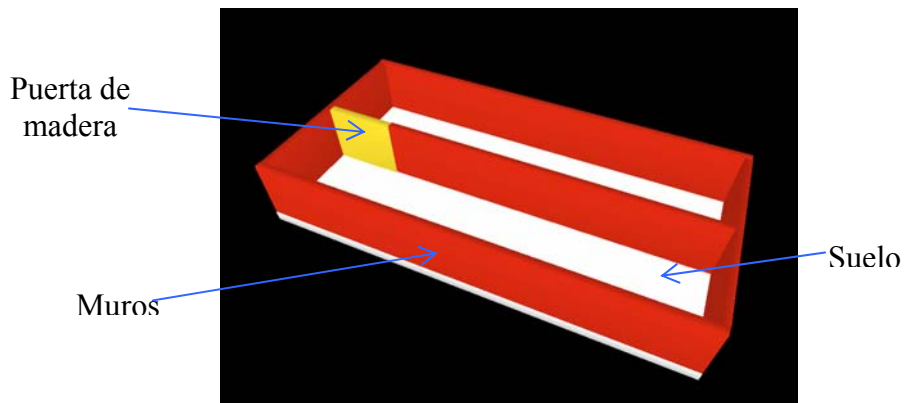
#### 9.2.3.1 Caso 3.1: Prueba de Propagación Directa sin Obstáculos: Influencia de $n$ y $X_{\sigma}$

El escenario consiste en un suelo cuadrado de 200 metros de lado con un muro de 35 metros de largo por 2,60 de alto, en uno de los laterales del suelo.

		
<p>Pot. Emisión = 35dBm  <math>n=3</math>                      PL(1m)=53dB  <math>X_{\sigma}=0</math>                      La ausencia de desviación típica produce círculos concéntricos perfectos (sólo influye la distancia <math>d</math>)</p>	<p>Pot. Emisión = 35dBm  <math>n=3</math>                      PL(1m)=53dB  <math>X_{\sigma}=5</math>                      La introducción de la desviación produce una dispersión de señal producida por la aleatoriedad.</p>	<p>Pot. Emisión = 35dBm  <math>n=2,5</math>                      PL(1m)=53dB  <math>X_{\sigma}=0</math>                      La variación de <math>n</math> a un valor inferior provoca menores pérdidas de propagación.</p>

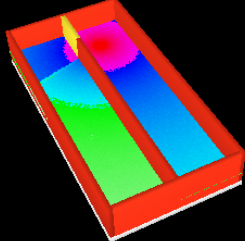
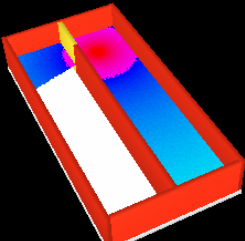
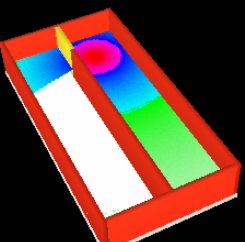
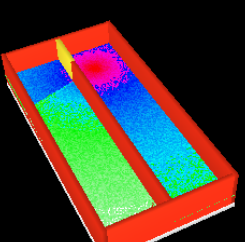
#### 9.2.3.2 Caso 3.2: Prueba de Propagación Directa con Obstáculos: Doble Pasillo

El entorno está constituido por dos pasillos paralelos de 20 metros de largo por 5 de ancho, separados por un muro en toda su longitud excepto en un extremo en el que hay una puerta de madera de 2 metros de ancho. En el caso de que sean varias plantas, todas son iguales. La potencia de emisión es de 20 dBm.



### 9.2.3.2.1 Prueba de Propagación Directa con Obstáculos: Influencia de Configuraciones de Materiales

Se indican las pruebas efectuadas de penetración de materiales indicando en cada caso las pérdidas de penetración configuradas.

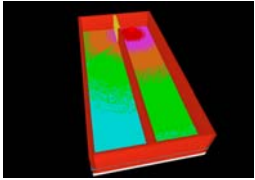
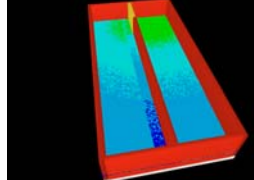
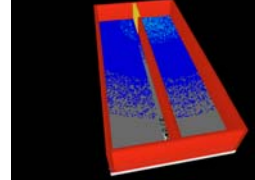

	<p><b>Caso 3.2.1.</b> Diferentes índices de penetración</p> <p>Suelo: 17 dB, Muros: 17 dB, Puerta de madera: 3 dB</p> <p>Observaciones: La penetración de la puerta no genera apenas pérdidas mientras que la incidencia del muro se hace muy evidente sobre todo comparando los niveles obtenidos en cada pasillo, uno con espacio libre y el otro siempre obstaculizado por el muro.</p>
	<p><b>Caso 3.2.2.</b> Obstáculo no penetrable</p> <p>Suelo: 17 dB, Muros: 100 dB, Puerta de madera: 3 dB</p> <p>Observaciones: La opacidad total del muro a la señal provoca que solo se detecte señal detrás de la puerta.</p>
	<p><b>Caso 3.2.3.</b> Incidencia de la variable de pérdida de propagación n</p> <p>Suelo: 17 dB, Muros: 17 dB, Puerta de madera: 3 dB</p> <p>Observaciones: Bajo las mismas condiciones del Caso 1 se aumenta el valor de n de 4 a 6, lo que simula un entorno de propagación más hostil por lo que el alcance de cobertura es mucho menor.</p>
	<p><b>Caso 3.2.4.</b> Incidencia de la variable Xsigma (desviación típica)</p> <p>Suelo: 17 dB, Muros: 17 dB, Puerta de madera: 3 dB</p> <p>Observaciones: Bajo las mismas condiciones del Caso 1 se aumenta el valor de Xsigma de 2 a 10 dB produciendo una mayor dispersión de resultados por influencia de esta variable aleatoria.</p>

**9.2.3.2.2 Prueba de Propagación Directa con Obstáculos: Entorno de Varias Plantas**

**Caso 3.2.5.** Entorno de varias plantas.

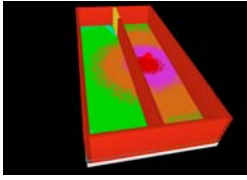
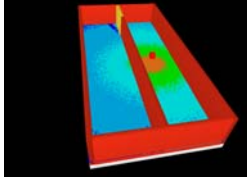
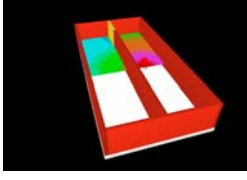
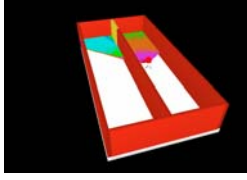
Suelo: 17 dB, Muros: 6 dB, Puerta de madera: 3 dB, n=2

Observaciones: Se observa el efecto de penetración del suelo de las diferentes plantas en la trayectoria ascendente de la señal. La atenuación acumulada hace que en la Planta 3 prácticamente no se detecte presencia de señal.

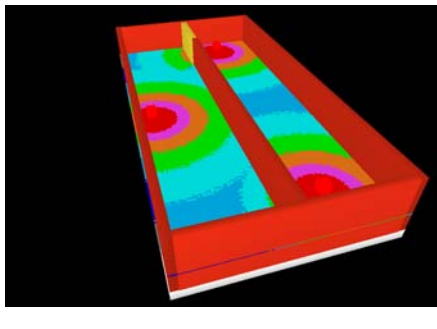
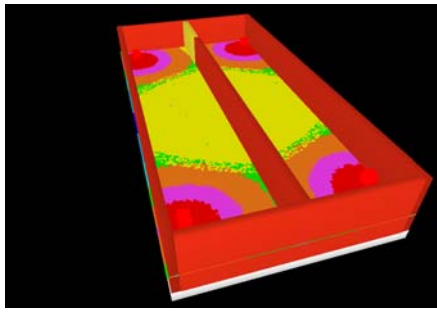
			
Planta 0	Planta 1	Planta 2	Planta 3

**9.2.3.2.3 Prueba de Propagación Directa con Obstáculos: Configuración de los Parámetros del Punto de Acceso**

**Caso 3.2.6.** Configuración de los parámetros del Punto de Acceso.

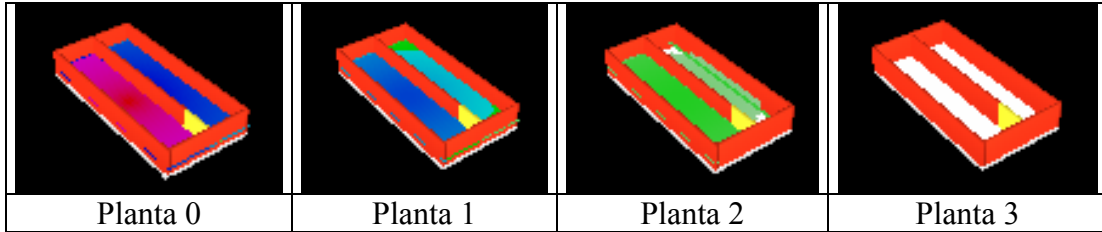
		Prueba de potencia: Los resultados presentan la variación en el espectro de potencias seleccionando 20 dBm de potencia de emisión (izquierda) y 0 dBm (derecha).
		Directividad: En el primer caso se ha configurado sólo directividad frontal y en el segundo sólo directividad frontal con ángulo de 45°. La directividad trasera se fija en los dos casos a 90° (sin radiación) y el ángulo con el eje X es de 270°

### 9.2.3.2.4 Prueba de Propagación Directa con Obstáculos: Interferencia por Solapamiento de Canales

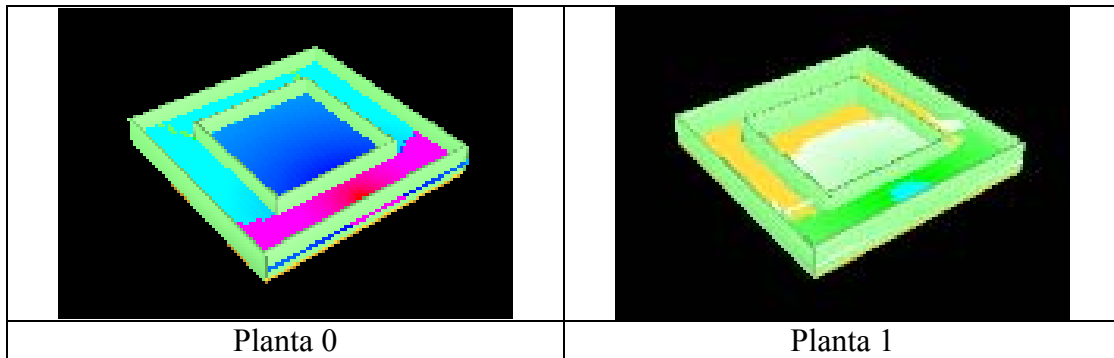
	<p><b>Caso 3.2.7.</b> 3 Puntos de Acceso funcionando en zonas solapadas</p> <p>Suelo: 17 dB; Muros: 17 dB; Puerta de madera: 3 dB; n=6; potencia de emisión 35 dB</p> <p>Observaciones: Cada AP define su celda sin provocar interferencias de canal. En las zonas donde existe solapamiento se producirá roaming transparente al usuario. El sensor mide la potencia más alta que le llega de los 3 Aps</p>
	<p><b>Caso 3.2.8.</b> 4 Puntos de Acceso funcionando en zonas solapadas</p> <p>Suelo: 17 dB, Muros: 17 dB, Puerta de madera: 3 dB; n=5; potencia de emisión 35 dB</p> <p>Observaciones: Fijando n=5 se obtiene que toda la zona central de la escena queda cubierta por los 4 Aps instalados en las esquinas. La zona presentada en amarillo sería el área donde existe solapamiento de canales provocando interferencias.</p>

### 9.2.4 Caso 4: Pruebas de Propagación Multiwall

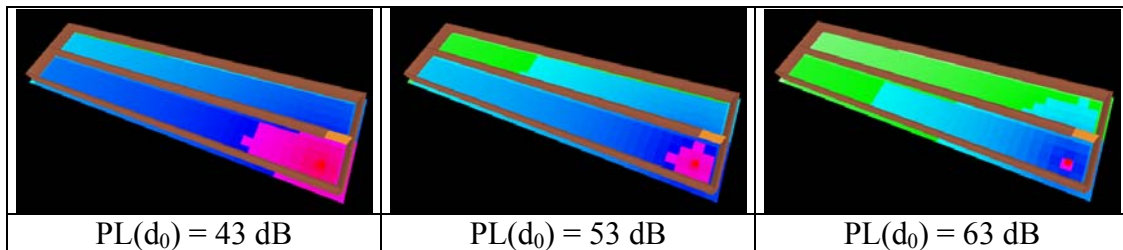
Se han tomado 4 plantas, y se ha hecho la simulación con una atenuación de suelos de 10 dB y una atenuación de muros de 6 dB.



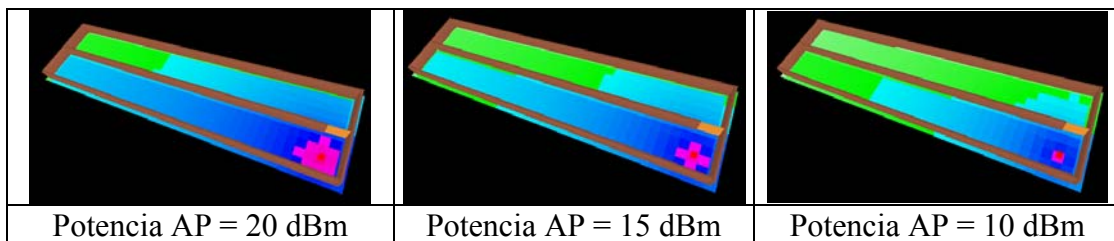
En este caso se han tomado 2 plantas, y los parámetros de simulación son los mismos que en el caso anterior.



Se prueban las modificaciones en el valor del parámetro  $PL(d_0)$  con potencia de emisión 20 dBm.



Se prueban las modificaciones en la potencia de emisión del punto de acceso con  $PL(d_0) = 53 \text{ dB}$ .



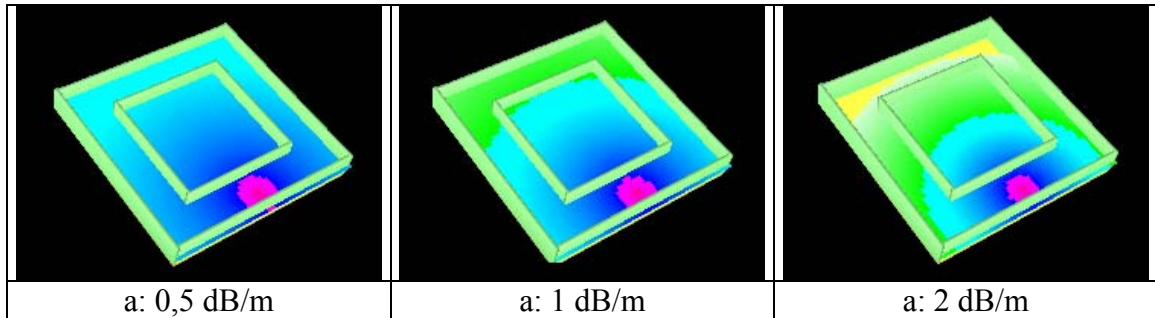


## 9.2.5 Caso 5: Pruebas de Propagación Linear Path

Este modelo no tiene en cuenta los muros, sólo se fija en el coeficiente de atenuación lineal por lo que es importante hacer una buena estimación.

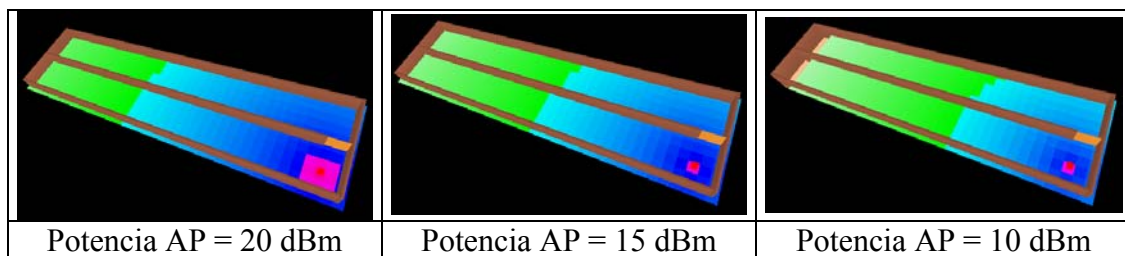
### 9.2.5.1 Prueba con distintos coeficientes de atenuación lineal

Configuración:  $PL(d_0) = 53$  dB y potencia de emisión 20 dBm.



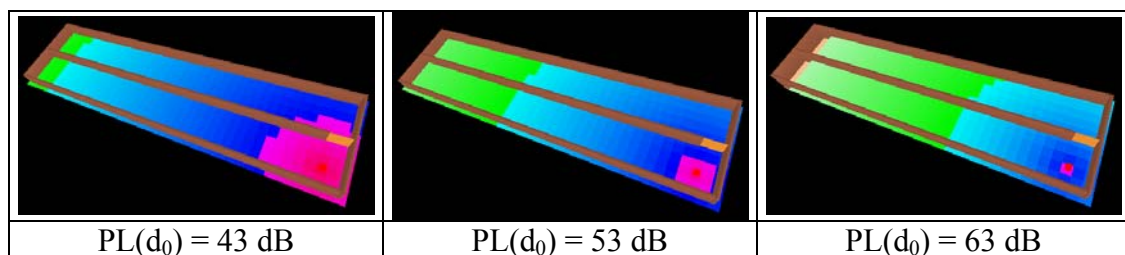
### 9.2.5.2 Prueba de modificaciones en la potencia de emisión del punto de acceso

Configuración:  $PL(d_0) = 53$  dB y coeficiente de atenuación 0,47.



### 9.2.5.3 Prueba de modificaciones en el valor de $PL(d_0)$

Configuración: potencia de emisión del punto de acceso 20 dBm y coeficiente de atenuación 0,47.



### 9.2.6 Caso 6: Pruebas de Propagación Dual Slope

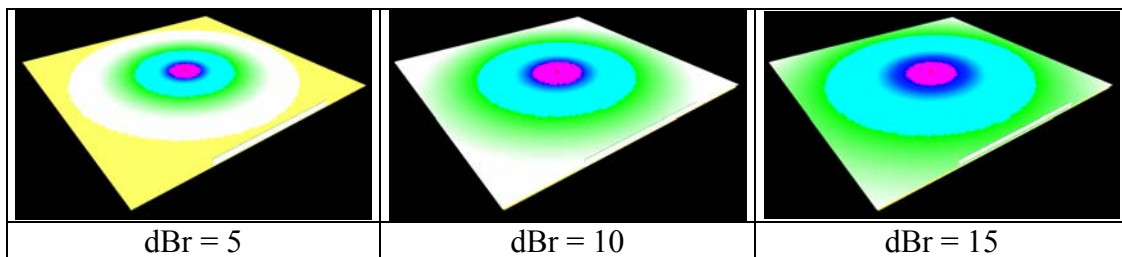
El principal parámetro de este modelo de propagación es la distancia de ruptura (dBr) para observarlo mejor se hará la prueba en un entorno de 200x200 m. La diferencia entre espacio libre y dual slope es prácticamente inapreciable y la longitud de onda es otro parámetro que se debe tener en cuenta, pero que viene dado por la frecuencia que se usa.

En todos los casos se utilizan estos parámetros:

- longitud de onda: 0,13
- diferencia espacio libre – dual slope: 0
- Potencia 20 dBm

#### 9.2.6.1 Prueba de modificación de punto de ruptura

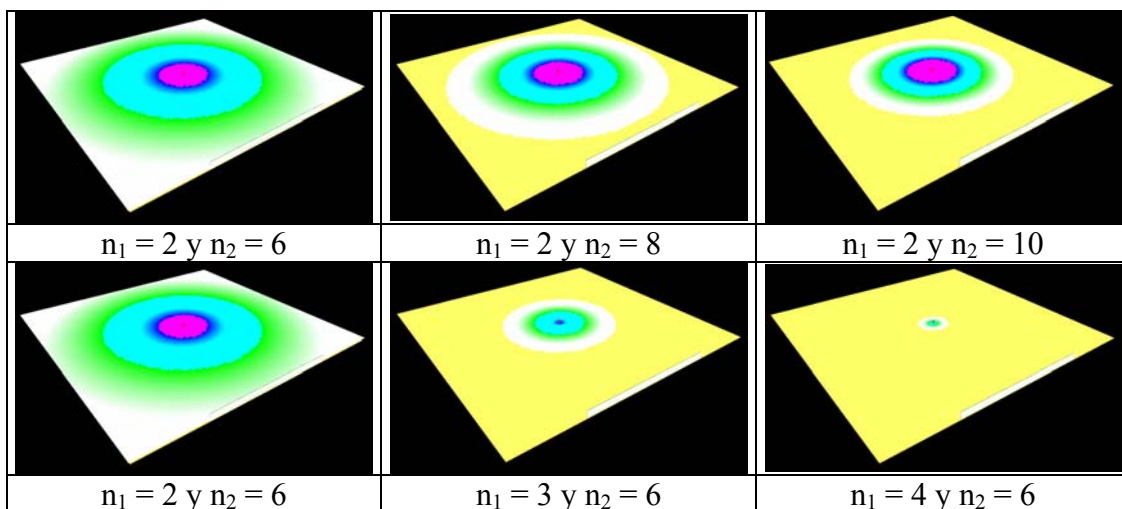
Configuración:  $n_1 = 2$ , y  $n_2 = 6$



#### 9.2.6.2 Prueba de modificación de exponentes $n_1$ y $n_2$

Hasta la distancia de ruptura, los resultados son iguales si se modifica sólo el exponente  $n_2$ .

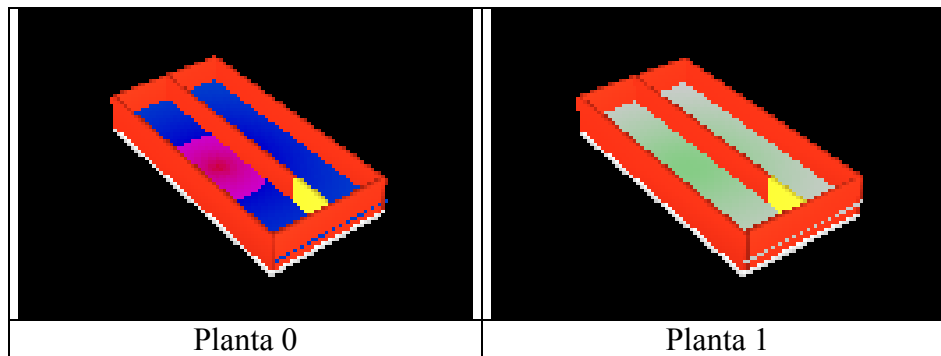
Configuración: dbr=10



### 9.2.7 Caso 7: Pruebas de Propagación Keenan-Motley

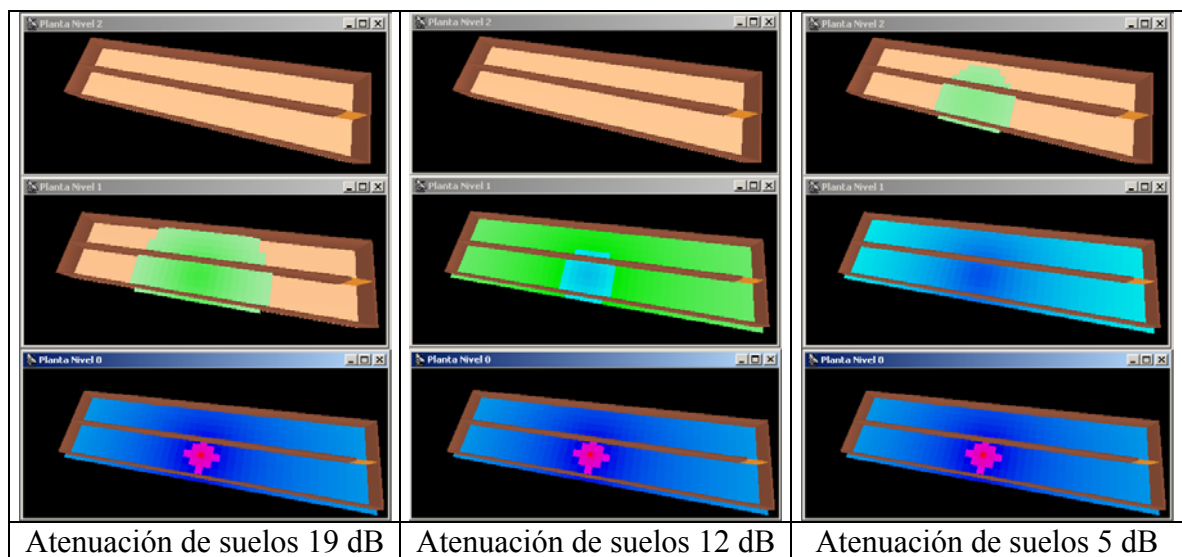
Este método de propagación solo tiene en cuenta las pérdidas por suelos por lo tanto en una misma planta solo tendrá las pérdidas por espacio libre.

Potencia de emisión 25 dBm.



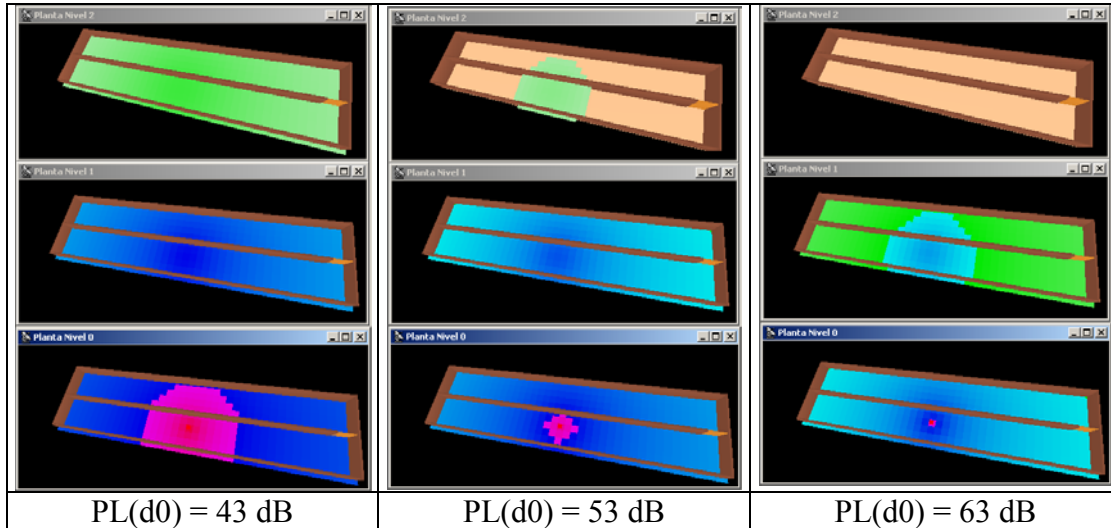
#### 9.2.7.1 Prueba de variaciones en la atenuación de suelos

Configuración: potencia de emisión 20 dBm, coeficiente  $n = 2,04$ , y  $PL(d0) = 53$  dB.



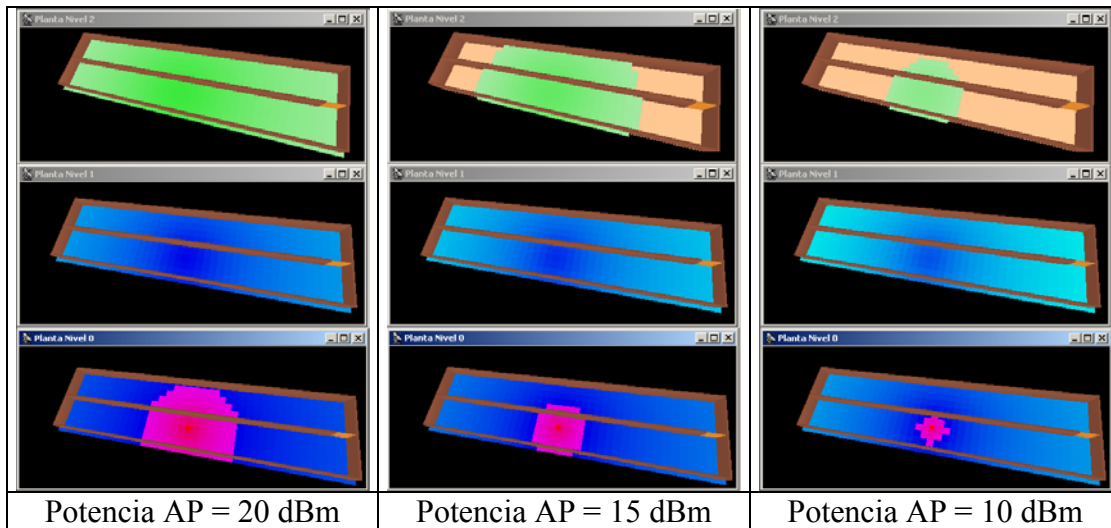
### 9.2.7.2 Prueba de variaciones en el PL(d0)

Configuración: potencia de emisión 20 dBm, coeficiente  $n = 2,04$ , y atenuación de suelo 5 dB.



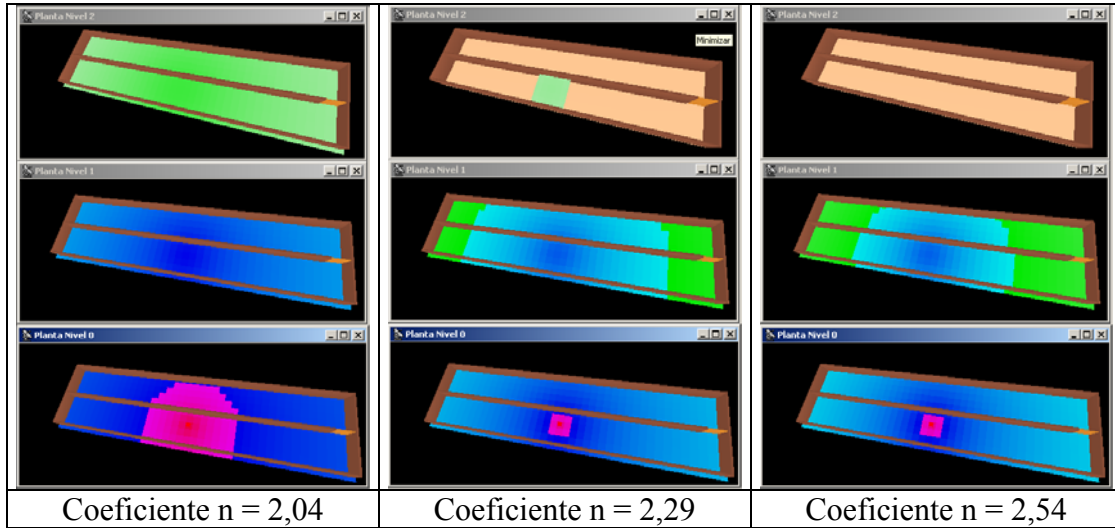
### 9.2.7.3 Prueba de variaciones en la potencia de emisión

Configuración: PL(d0) = 43 dB, coeficiente  $n = 2,04$ , y atenuación de suelo 5 dB.



### 9.2.7.4 Prueba de variaciones en el coeficiente de atenuación

Configuración: potencia de emisión 20 dBm, con el PL(d0) = 43 dB, y atenuación de suelo 5 dB.





# CAPÍTULO 10

## CALIBRACIÓN Y PRUEBAS REALES

---

### 10.1 Calibración

En este apartado, realizaremos la calibración del modelo basándonos en datos de campo tomados en ubicaciones reales.

Las calibraciones realizadas a partir de medidas de campo, van a permitir ajustar el modelo para propagación directa, y propagación multitrayecto principalmente; aunque también se utilizará alguna medida para otros modelos de propagación.

En el último apartado, comprobaremos los resultados de aplicar el modelo en recintos reales, en los que se pueda comprobar experimentalmente la adecuación del modelo, y compararemos sus resultados con otros modelos de propagación.

#### 10.1.1 Ajuste del Modelo de Cobertura basado en mediciones

Las medidas se han llevado a cabo mediante un terminal portátil *Compaq Presario 2500* equipado con una tarjeta *Wireless Compaq W110*. Se ha utilizado como software de medición la utilidad proporcionada por Compaq con la tarjeta la cual, entre otras cosas, proporciona medidas de recepción de señal en dBm.

Se instaló el punto de acceso Compaq VL-410 a una altura de 1,20 metros en la planta baja del edificio, realizándose 3 fases de medición:

- Fase 1: Medidas de corta distancia con LOS, en aula (punto AP1)
- Fase 2: Medidas de larga distancia con LOS en pasillo (punto AP2)
- Fase 3: Medidas con NLOS (punto AP3)

Se ha determinado la distancia de referencia  $d_o$  como 1 metro, obteniéndose los siguientes resultados:

Tipo de Medida	Distancia (d)	PR(d)
Fase 1 (Aula)	$d_o = 1$ metro	-33 dBm
	1,65 m	-36 dBm
AP1	2,50 m	-39 dBm
	4,20 m	-41 dBm
	5,90 m	-44 dBm

	6,75 m	-46 dBm
	8,45 m	-48 dBm
Fase 2 (Pasillo) AP2	12,25 m	-50 dBm
	14,70 m	-50 dBm
	17,20 m	-56 dBm
	22,30 m	-51 dBm
	26,20 m	-53 dBm
	33,30 m	-54 dBm
	39,00 m	-59 dBm
	45,40 m	-63 dBm
Fase 3	P <sub>1</sub>	-57 dBm
	P <sub>2</sub>	-57 dBm
AP3	P <sub>3</sub>	-47 dBm
	P <sub>4</sub>	-62 dBm

Los puntos P<sub>i</sub> corresponden a las esquinas del aula donde se realizó la medida.

La representación gráfica de estos valores representa la función logarítmica en función de la distancia esperada como en todos los modelos vistos.

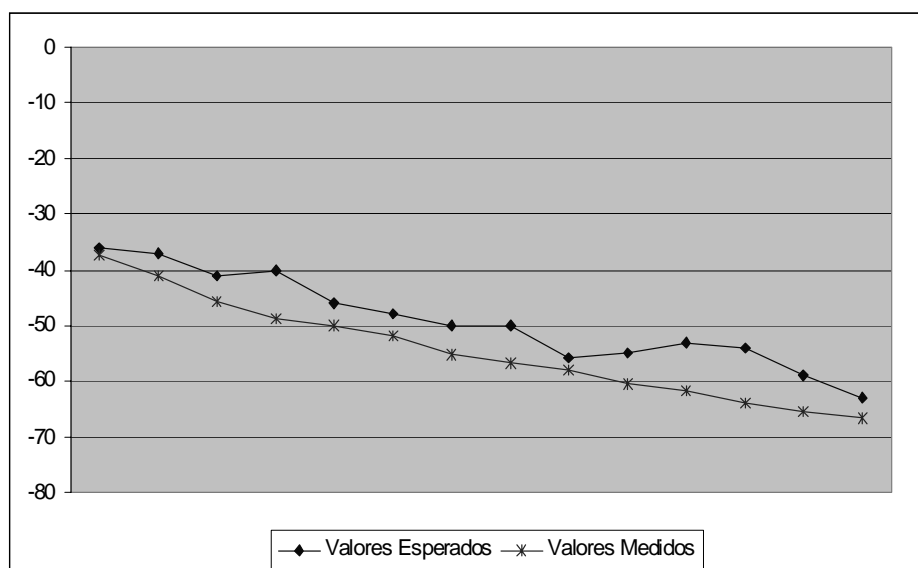


Figura 85 Relación entre valores medidos y curva logarítmica esperada

A partir de estos datos hemos calculado el valor de la variable de pérdida de propagación como la media aritmética del resultado de su resolución, según la fórmula general del modelo, para todas las medidas realizadas.

Distancia (d)	PR(d)	n	Varianza
1,65 m	-36dBm	0,065245183	-1,42967025
2,50 m	-39 dBm	0,159176003	-4,10516392
4,20 m	-41 dBm	0,498599432	-4,6942191
5,90 m	-44 dBm	0,539596408	-8,70056233
6,75 m	-46 dBm	1,078094905	-3,89109632



8,45 m	-48 dBm	1,390285063	-3,87803535
12,25 m	-50 dBm	1,849831351	-5,16294208
14,70 m	-50 dBm	1,984439469	-6,77569014
17,20 m	-56 dBm	2,841715428	-2,16500067
22,30 m	-51 dBm	2,966270699	-5,46200856
26,20 m	-53 dBm	2,836602583	-8,88768206
33,30 m	-54 dBm	3,19713289	-10,008845
39,00 m	-59 dBm	4,136767978	-6,40649133
45,40 m	-63 dBm	4,971167559	-3,75058806
		2,036780354	6,38278402

Al introducir la variable  $n$  en el modelo, éste queda como:

$$P(R) = 53 - 20,37 \log(d)$$

La parametrización de variable  $X_\sigma$  se ajusta al valor de la desviación típica de la serie obtenida. No obstante, se deja a consideración del usuario su ajuste ya que puede modelar efectos no previstos en el trayecto como obstáculos humanos, interferencias silenciosas, etc.

La **varianza**  $S^2$ , se define como la media de las diferencias cuadráticas de  $n$  puntuaciones con respecto a su media aritmética,

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^2 - \bar{x}^2) \quad \text{por tanto} \quad S^2 = 6,38$$

Para que la medida de dispersión sea de la misma dimensionalidad que las observaciones, bastará con tomar su raíz cuadrada. Por ello se define la **desviación típica**  $S$ , como:

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{luego} \quad S = 2,53$$

Con estos datos, el modelo de propagación directa que se va a utilizar para calcular la pérdida de trayecto en el espacio libre será:

$$P(R) = 53 - 20,37 \log(d) + \text{Aleatorio}(X\sigma)$$

## 10.2 Casos de prueba reales

Se han realizado pruebas en la red inalámbrica instalada en el edificio de Ciencias, que es dónde estaba situada hasta el curso pasado la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica en Informática de Oviedo. Las pruebas se han realizado en la planta baja, y en la planta bajo cubierta.

### 10.2.1 Caso 8: Prueba de Modelo Real (Edificio de Ciencias – Planta Baja — Punto de acceso central)

Se ha creado un modelo de la planta baja del edificio de Ciencias (antigua Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica en Informática). La configuración de los diferentes parámetros ha sido la siguiente:

Potencia de emisión: 20 dBm.

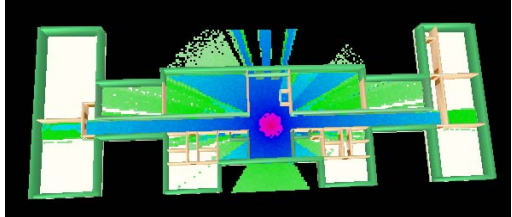

Parámetros de Materiales:

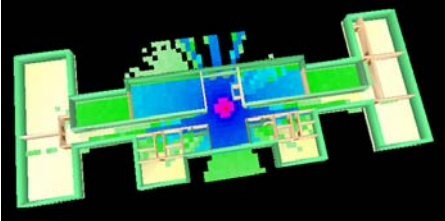
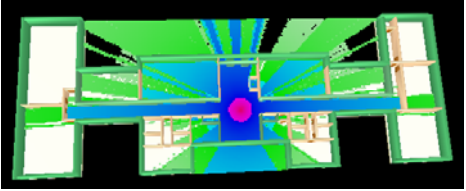
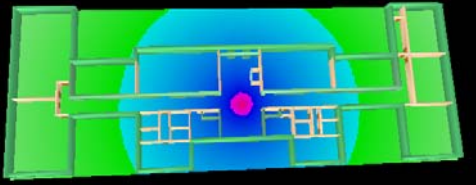
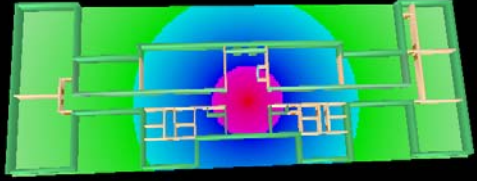
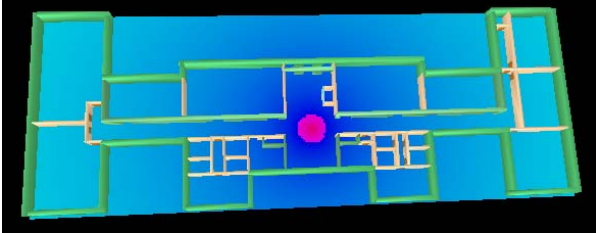
- Suelo: penetrabilidad (15dB), reflectividad (80%)
- Muros muy gruesos: penetrabilidad (25dB), reflectividad (80%)
- Muros gruesos: penetrabilidad (15dB), reflectividad (80%)
- Muros finos: penetrabilidad (6dB), reflectividad (80%)
- Cristal: penetrabilidad (3dB), reflectividad (75%)
- Puertas: penetrabilidad (3dB), reflectividad (50%)

Parámetros de propagación generales:

- Path loss a 1 metro: 53 dB

Y se han obtenido los siguientes resultados de propagación:

	
<p>Propagación directa                      Path Loss Exponent (n): 2,08                      Distancia de referencia (d0): 1 m                      Path Loss en d0: 53 dB                      Desviación estándar Xsigma: 1,96</p>	<p>Propagación Multitrayecto                      Área máxima de superficie: 10 m<sup>2</sup>                      Factor de energía total: 100                      Convergencia: 20 dB</p>

	
<p>Propagación conjunta</p>	<p>Propagación Multiwall          Factor de atenuación de suelos: 18,3 dB          Factor de atenuación de muros: 5 dB</p>
	
<p>Propagación Linear Path          Coeficiente de atenuación lineal: 0,47 dB/m</p>	<p>Propagación Dual Slope          Distancia de ruptura (dBr): 5          Path Loss Exponent (n1): 2          Path Loss Exponent (n2): 6          Diferencia Dual Slope – Free Space: 0          Longitud de onda: 0,13</p>
	
<p>Propagación Keenan-Motley</p>	

### 10.2.2 Caso 9: Prueba de Modelo Real (Edificio de Ciencias – Planta Baja – Punto de acceso lateral)

En el caso anterior se utilizó un punto de acceso colocado temporalmente en el centro de la planta para realizar las pruebas. En este caso, las mediciones y predicciones se han realizado con un punto de acceso real situado en un ala de la planta.

El punto de acceso ha sido un Cisco Aironet 1100, y las mediciones se han realizado con una PDA HP ipaq serie hx 2400.

En el periodo en el que se realizaron las mediciones, había interferencias de múltiples redes inalámbricas. Se detectaban más de 6 redes inalámbricas (ajenas a nuestras pruebas e imposibles de controlar por ser de los edificios cercanos), lo que inevitablemente llevaba a que las mediciones estuvieran influidas por las interferencias de las señales en las mismas frecuencias.

Se seleccionó el canal del punto de acceso (por lo tanto la frecuencia) al que supuestamente sufriría menos interferencias.

La configuración de los diferentes parámetros ha sido la siguiente:

- Potencia de emisión: 20 dBm.

Parámetros de Materiales:

- Suelo: penetrabilidad (25dB), reflectividad (80%)
- Muros muy gruesos: penetrabilidad (25dB), reflectividad (80%)
- Muros gruesos: penetrabilidad (15dB), reflectividad (80%)
- Muros finos: penetrabilidad (6dB), reflectividad (80%)
- Cristal: penetrabilidad (3dB), reflectividad (75%)
- Puertas: penetrabilidad (3dB), reflectividad (50%)

Parámetros de propagación generales:

- Path loss a 1 metro: 43 dB

Los resultados de cobertura obtenidos en la medición son los que se muestran en la *Figura 86*. Los resultados numéricos se muestran en las tablas *Tabla 37* y *Tabla 38* del *ANEXO B*, en el apartado *Prueba de propagación (Planta Baja, Punto Acceso lateral)*. Se han representado únicamente los puntos en los que se ha detectado señal superior a -100 dBm, por lo que se puede concluir que las zonas con cobertura real serían únicamente las mostradas

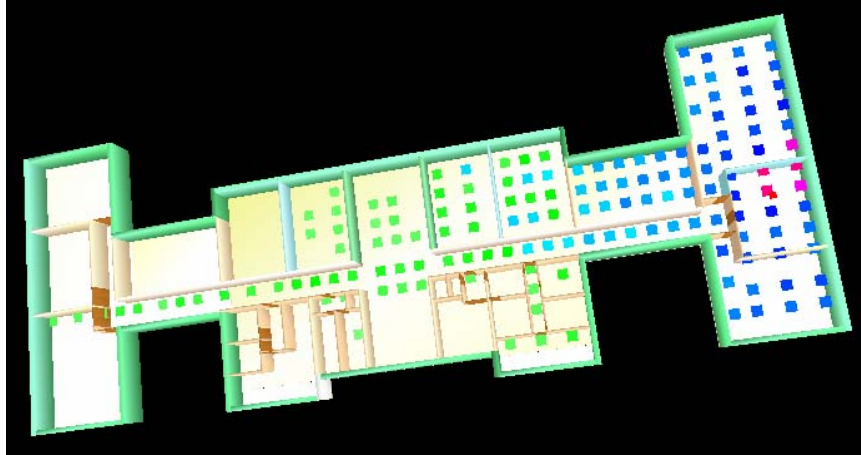


Figura 86 Valores de cobertura reales medidos en el escenario

Se puede observar el efecto que el pasillo produce sobre la señal, que hace que llegue hasta el ala opuesta del edificio.

En cuanto a las predicciones obtenidas de los diferentes modelos de propagación, se mostrarán a continuación los resultados comparados con los datos reales de cobertura.

Se mostrarán en primer lugar las predicciones completas, y posteriormente las imágenes comparadas en los puntos en los que hay medición real.

### 10.2.2.1 Propagación Directa vs Medidas Reales

Los datos de cobertura obtenidos se encuentran en la *Tabla 37* y la *Tabla 38* del *Anexo B*, apartado *Prueba de propagación (Planta Baja, Punto Acceso lateral)*

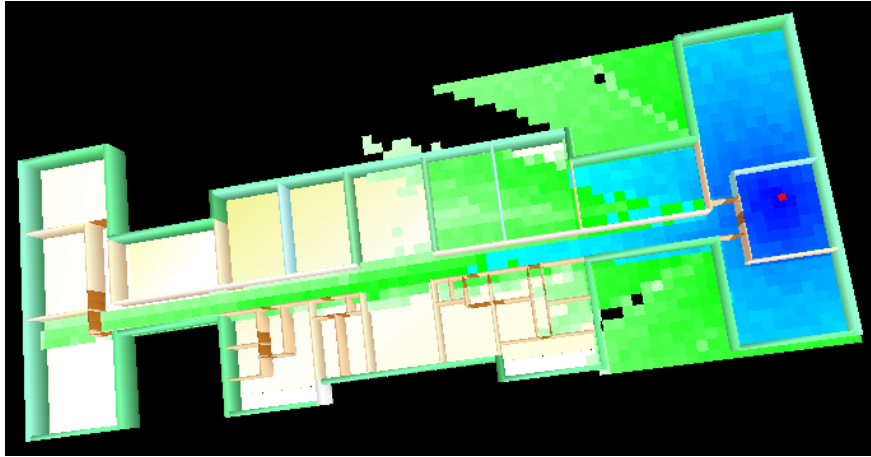


Figura 87 Simulación de propagación Directa

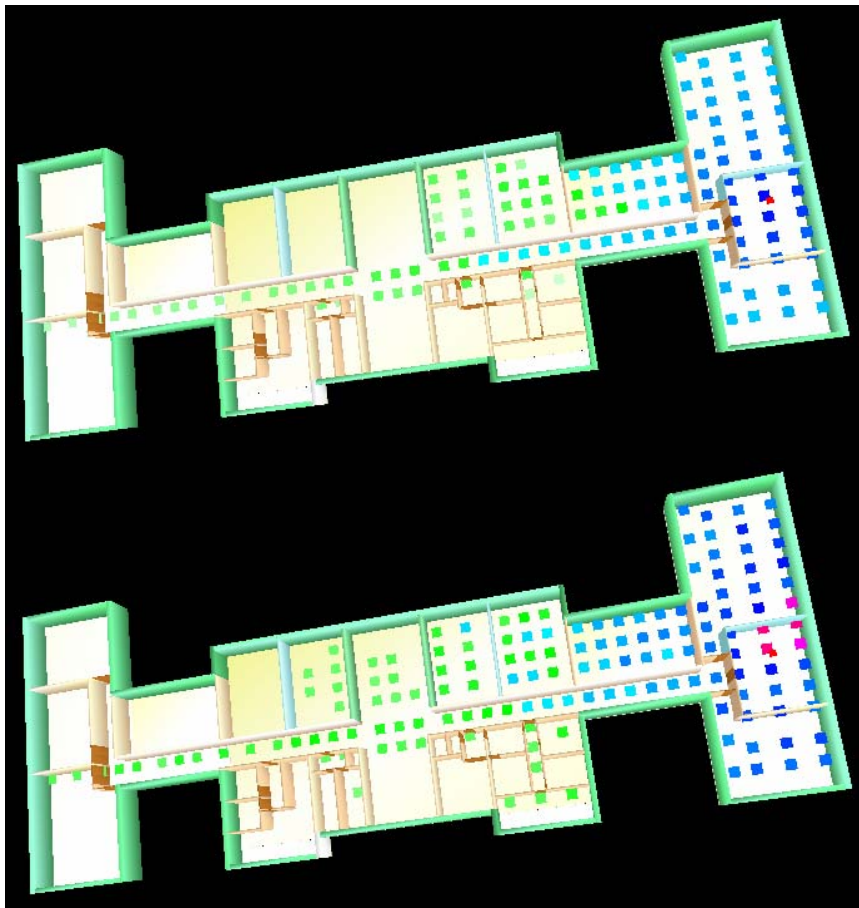


Figura 88 Propagación Directa (arriba) vs Medidas Reales (abajo)

### 10.2.2.2 Propagación Multitrayecto vs Medidas Reales

Los datos de cobertura obtenidos se encuentran en la *Tabla 37* y la *Tabla 38* del *Anexo B*, apartado *Prueba de propagación (Planta Baja, Punto Acceso lateral)*

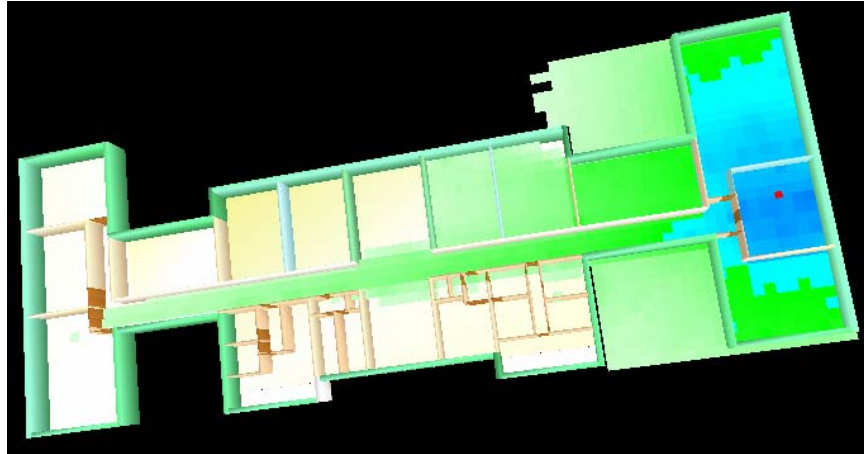


Figura 89 Simulación de propagación Multitrayecto

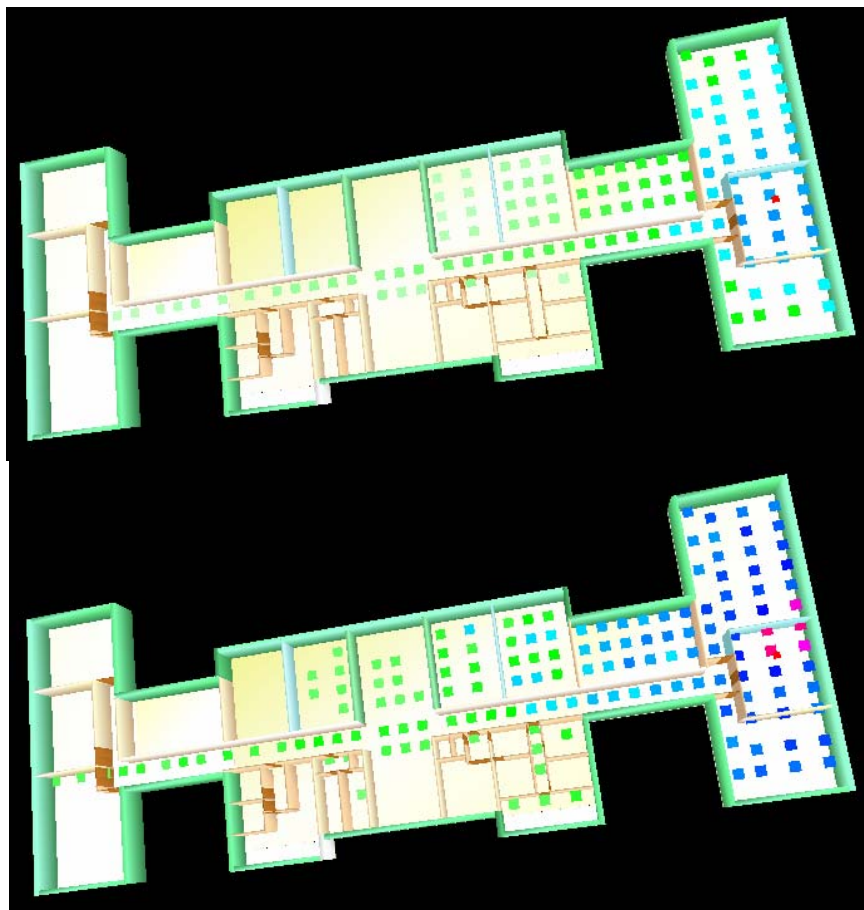


Figura 90 Propagación Multitrayecto (arriba) vs Medidas Reales (abajo)

### 10.2.2.3 Propagación Conjunta (tesis) vs Medidas Reales

Los datos de cobertura obtenidos se encuentran en la *Tabla 37* y la *Tabla 38* del *Anexo B*, apartado *Prueba de propagación (Planta Baja, Punto Acceso lateral)*

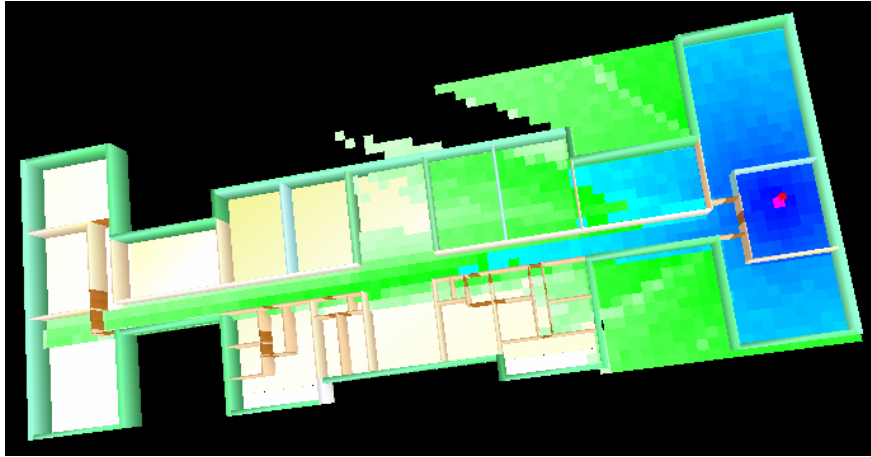


Figura 91 Simulación de propagación Conjunta (tesis)

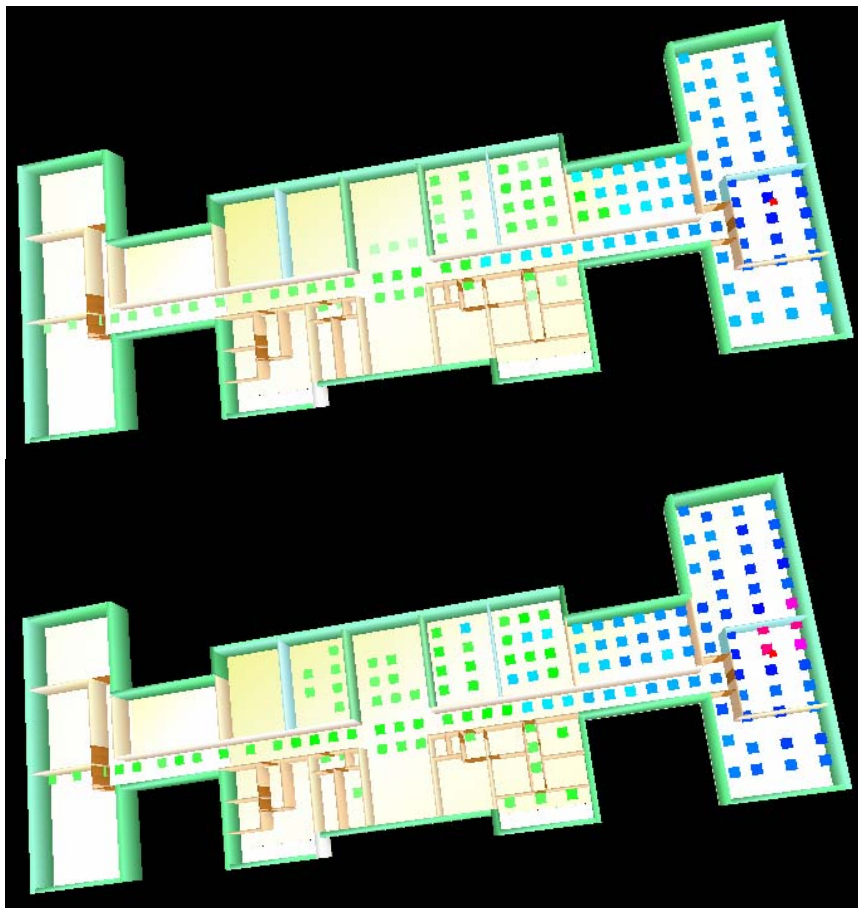


Figura 92 Propagación Conjunta (arriba) vs Medidas Reales (abajo)



### 10.2.2.4 Propagación Multi-Wall vs Medidas Reales

Los datos de cobertura obtenidos se encuentran en la *Tabla 37* y la *Tabla 38* del *Anexo B*, apartado *Prueba de propagación (Planta Baja, Punto Acceso lateral)*

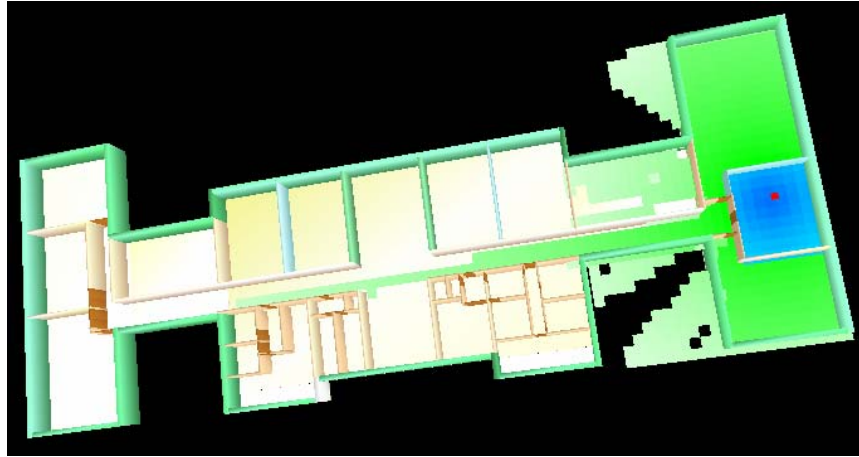


Figura 93 Simulación de propagación Multi-Wall

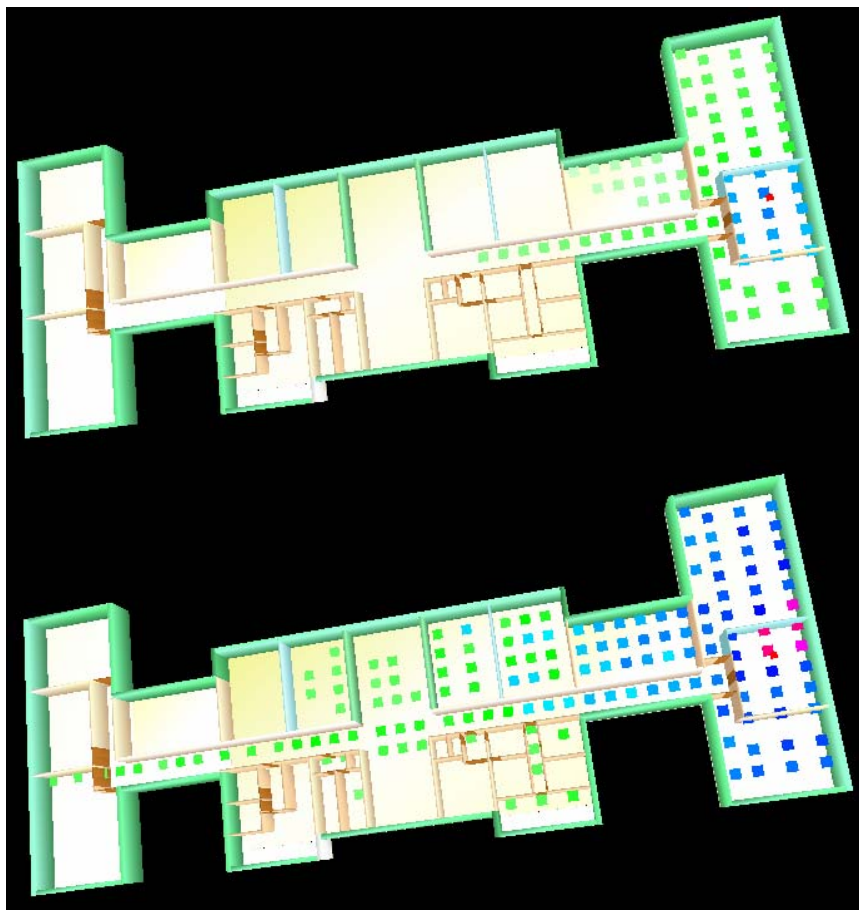


Figura 94 Propagación Multi-Wall (arriba) vs Medidas Reales (abajo)

### 10.2.2.5 Propagación Linear-Path vs Medidas Reales

Los datos de cobertura obtenidos se encuentran en la *Tabla 37* y la *Tabla 38* del *Anexo B*, apartado *Prueba de propagación (Planta Baja, Punto Acceso lateral)*

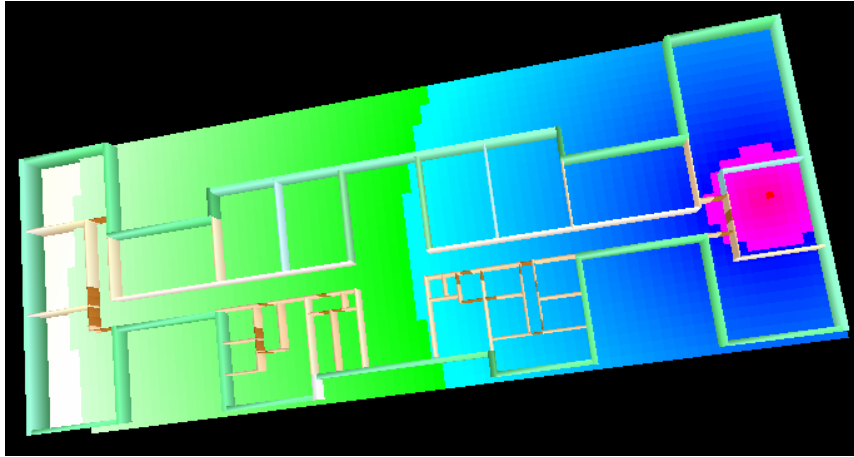


Figura 95 Simulación de propagación Linear-Path

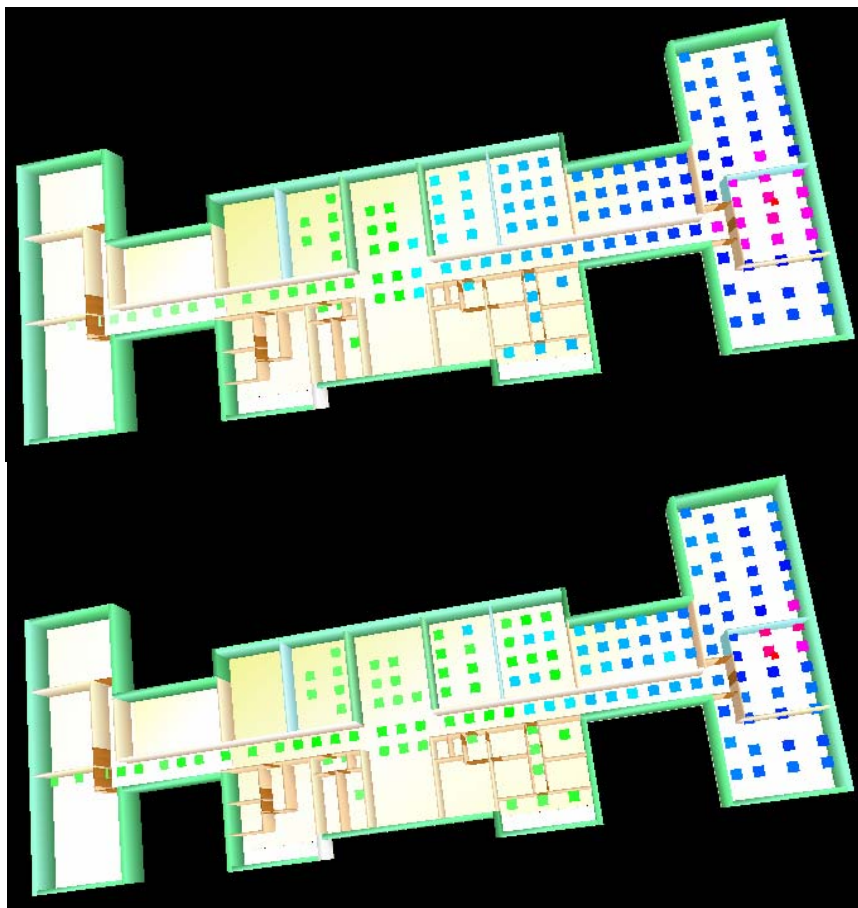


Figura 96 Propagación Linear-Path (arriba) vs Medidas Reales (abajo)

### 10.2.2.6 Propagación Dual-Slope vs Medidas Reales

Los datos de cobertura obtenidos se encuentran en la *Tabla 37* y la *Tabla 38* del *Anexo B*, apartado *Prueba de propagación (Planta Baja, Punto Acceso lateral)*

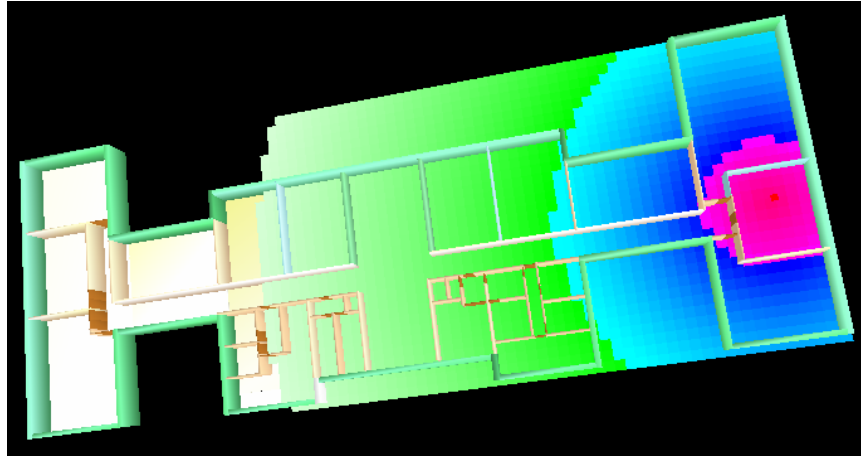


Figura 97 Simulación de propagación Dual-Slope

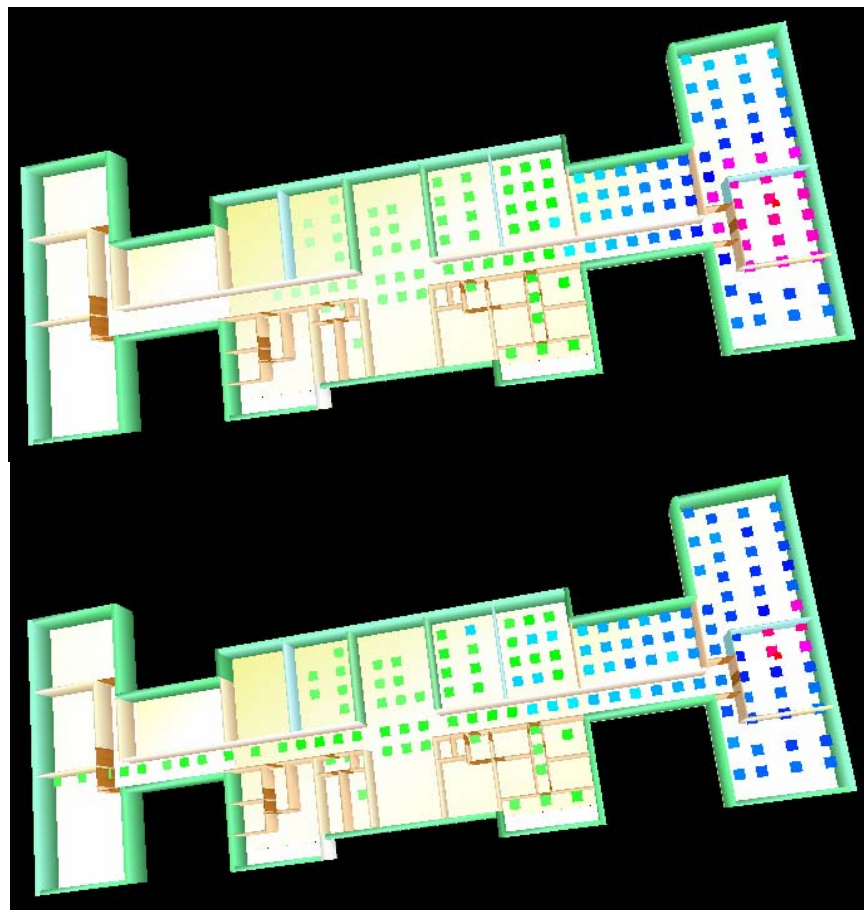


Figura 98 Propagación Dual-Slope (arriba) vs Medidas Reales (abajo)

### 10.2.2.7 Propagación Keenan-Motley vs Medidas Reales

Los datos de cobertura obtenidos se encuentran en la *Tabla 37* y la *Tabla 38* del *Anexo B*, apartado *Prueba de propagación (Planta Baja, Punto Acceso lateral)*

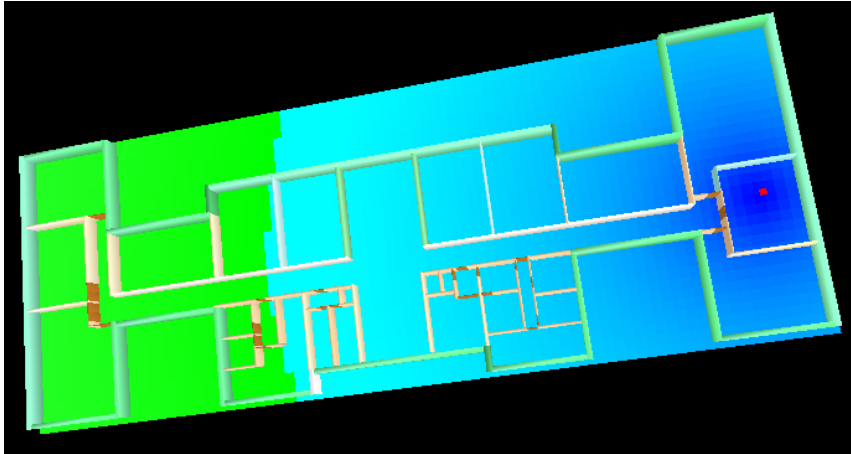


Figura 99 Simulación de propagación Keena-Motley

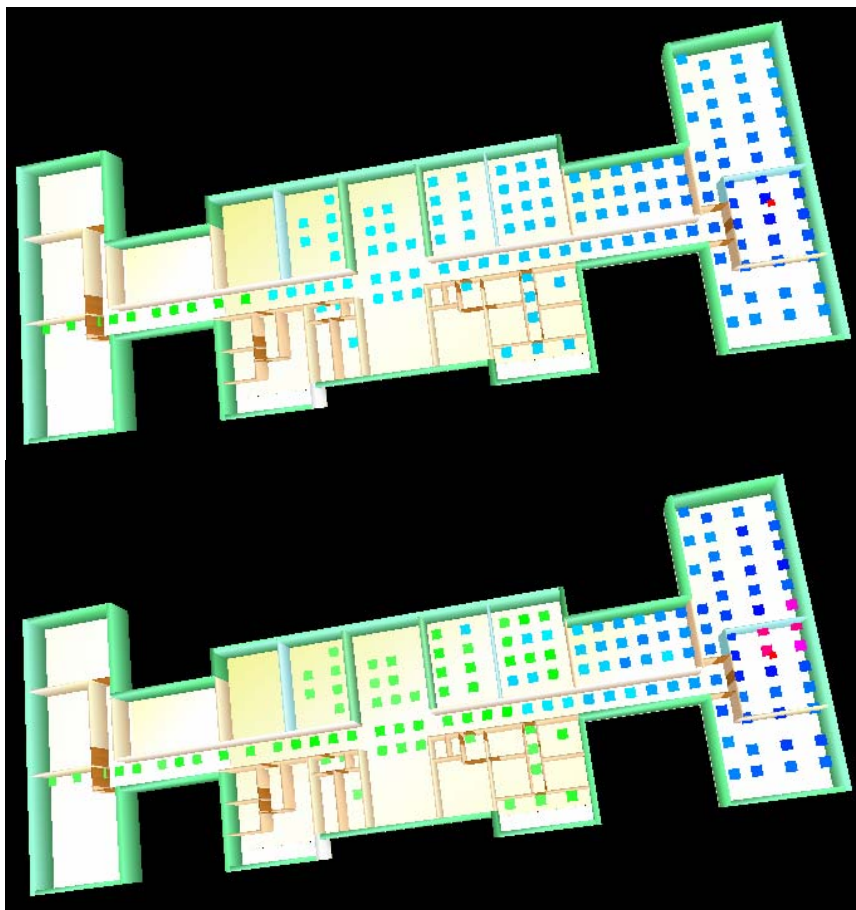


Figura 100 Propagación Keena-Motley (arriba) vs Medidas Reales (abajo)

### 10.2.3 Caso 10: Prueba de Modelo Real (Edificio de Ciencias – Planta Bajocubierta)

El escenario es la tercera planta (bajocubierta) del edificio de Ciencias, que es la zona en la que se encuentran la mayoría de los despachos de profesores del Departamento de Informática en Oviedo.

El entorno es bastante enrevesado, con muchos muros interiores y una forma irregular. Los muros exteriores, son muy gruesos.

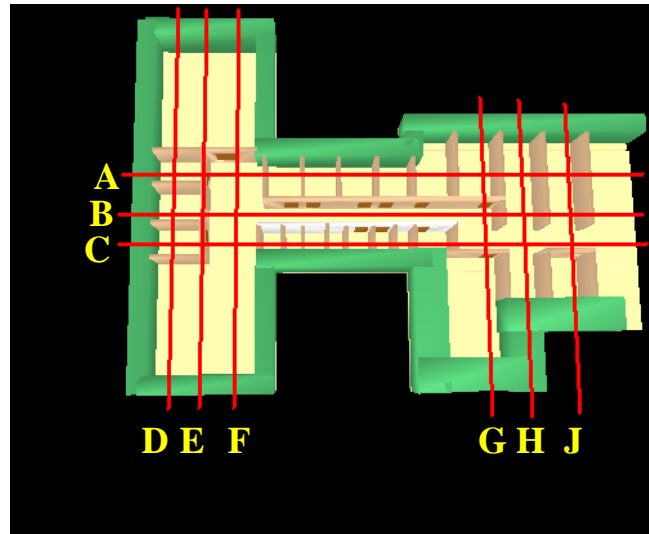


Figura 101 Escenario Real Edificio Ciencias (Bajocubierta)

La correspondencia de coordenadas con las líneas del gráfico es:

- La línea A: mediciones con coordenada  $Z = 2$
- La línea B: mediciones con coordenada  $Z = 0,25$
- La línea C: mediciones con coordenada  $Z = -2$
- La línea D: mediciones con coordenada  $X = 13$
- La línea E: mediciones con coordenada  $X = 11$
- La línea F: mediciones con coordenada  $X = 9$
- La línea G: mediciones con coordenada  $X = -11$
- La línea H: mediciones con coordenada  $X = -14$
- La línea J: mediciones con coordenada  $X = -18$

Las tablas con los valores de señal en los sensores situados en las diferentes líneas del gráfico de la *Figura 102*, y para los diferentes modelos de propagación, se encuentran en el apartado *Prueba de propagación (Planta Baja, Punto Acceso lateral)* del *Anexo B*. También se incluyen los valores reales medidos para los sensores de las líneas correspondientes.

Las medias de las desviaciones de los resultados en los distintos modelos, respecto a los datos reales medidos en todo el entorno, se muestran en la *Tabla 8*:

Unidades: dBm	Directa	Multi-trayecto	Conjunta (tesis)	Multi-Wall	Linear-Path	Dual-Slope	Keenan-Motley
Media de las desviaciones	10,7	5,83	0,52	21,91	-15,5	-10,8	-20,52
Media del valor absoluto de las desviaciones	15,9	6,36	6,3	24,6	15,9	11,2	20,8

Tabla 8 Desviaciones de intensidad de señal respecto a medidas reales (Bajocubierta)

Se puede apreciar que el modelo propuesto en esta tesis proporciona las menores desviaciones respecto a los datos reales. También se aprecia que los modelos Linear-Path, Dual-Slope y Keenan-Motley son claramente optimistas en el entorno estudiado: gran parte de sus desviaciones indican que hay más señal de la que hay. Y que el modelo Multi-Wall parece claramente pesimista.

### 10.2.3.1 Bajocubierta: Línea A

En el gráfico de la *Figura 102* se muestran gráficamente los valores en la línea A de la *Figura 101*, que corresponden a sensores con la coordenada Z=2. (Los valores numéricos están en la *Tabla 39* del *Anexo B*).

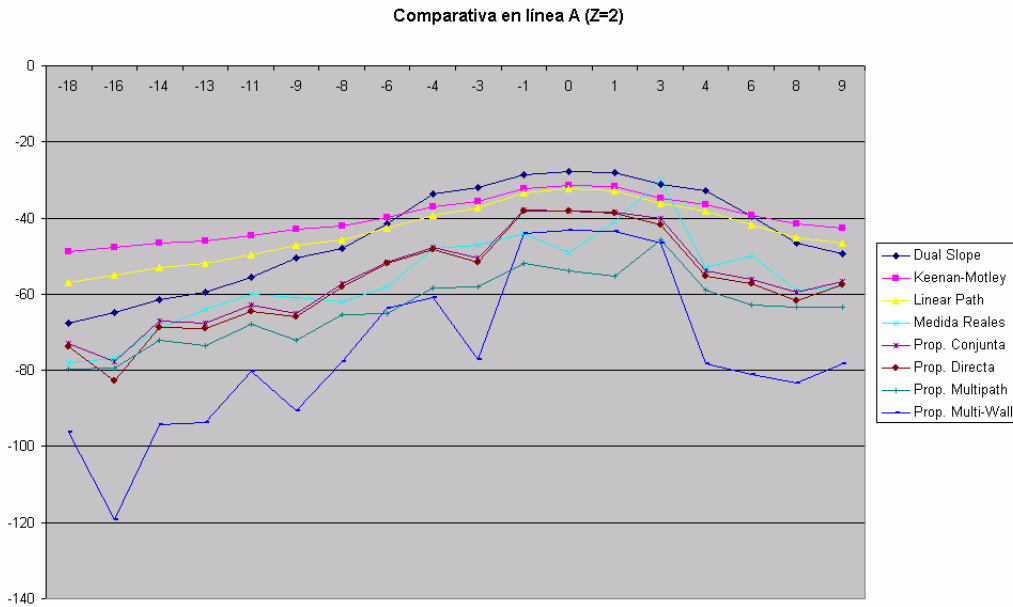


Figura 102 Gráfico de resultados ZonaWiFi — Bajocubierta Línea A

En la *Tabla 9* se muestran las medias de las desviaciones de los resultados en los distintos modelos, respecto a los datos reales medidos en los sensores de la línea A.

Unidades: dBm	Directa	Multi-trayecto	Conjunta (tesis)	Multi-Wall	Linear-Path	Dual-Slope	Keenan-Motley
Media de las desviaciones	0,85	7,7	-0,34	19,07	-12,4	-11,6	-15,92
Media del valor absoluto de las desviaciones	4,61	7,7	3,99	19,7	13,1	11,8	16,4

Tabla 9 Desviaciones de intensidad de señal respecto a medidas reales (Bajocubierta — Línea A)

En los sensores situados en la línea A, no se tiene visión directa, por lo que siempre hay al menos un obstáculo. Los obstáculos son muros finos y puertas de madera.

Se aprecia que el modelo propuesto también proporciona las desviaciones menores respecto a los datos reales. Y siguen apareciendo los mismos modelos optimistas y el pesimista. El modelo Multitrayecto, es normal que sea pesimista en mediciones que se realicen a corta distancia del punto de acceso, por tener mayor peso la señal directa, que las reflejadas.

### 10.2.3.2 Bajocubierta: Línea B

En el gráfico de la *Figura 103* se muestran gráficamente los valores en la línea B de la *Figura 101*, que corresponden a sensores con la coordenada  $Z=0,25$ . (Los valores numéricos están en la *Tabla 40* del *Anexo B*).

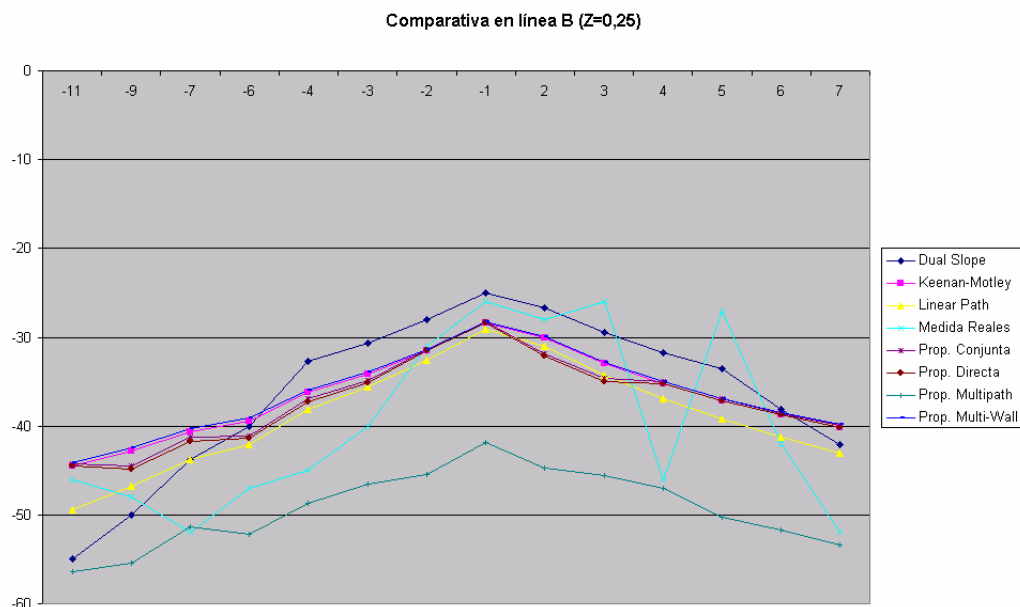


Figura 103 Gráfico de resultados ZonaWiFi — Bajocubierta Línea B

En la *Tabla 10* se muestran las medias de las desviaciones de los resultados en los distintos modelos, respecto a los datos reales medidos en los sensores de la línea B.

Unidades: dBm	Directa	Multi-trayecto	Conjunta (tesis)	Multi-Wall	Linear-Path	Dual-Slope	Keenan-Motley
Media de las desviaciones	-2,4	9,62	-2,63	-3,4	-0,93	-3,52	-3,14
Media del valor absoluto de las desviaciones	6,09	9,71	6,2	6,44	5,43	6,52	6,3

Tabla 10 Desviaciones de intensidad de señal respecto a medidas reales (Bajocubierta - Línea B)

Los mejores valores los obtiene el método Linear-Path.

En esta línea se cubre todo el pasillo en el que está situado el punto de acceso. La señal medida en el pasillo, sufre unas variaciones anómalas, debido al efecto de múltiples señales generadas por las reflexiones.

El modelo de multitrayecto, es pesimista por tener mucho más peso la señal directa que las reflejadas, igual que en caso anterior. En el gráfico de la *Figura 103*,



se ve cómo al ser puntos en línea de visión, las señales del resto de los modelos es superior a la señal reflejada (Multitrayecto).

Las desviaciones no son muy elevadas, y en ningún caso implicarían diferencias entre tener o no cobertura inalámbrica, ya que la señal más pequeña (-56,4 dBm) sigue siendo una cobertura excelente.

### 10.2.3.3 Bajocubierta: Línea C

En el gráfico de la *Figura 104* se muestran gráficamente los valores en la línea C de la *Figura 101*, que corresponden a sensores con la coordenada  $Z = -2$ . (Los valores numéricos están en la *Tabla 41* del *Anexo B*).

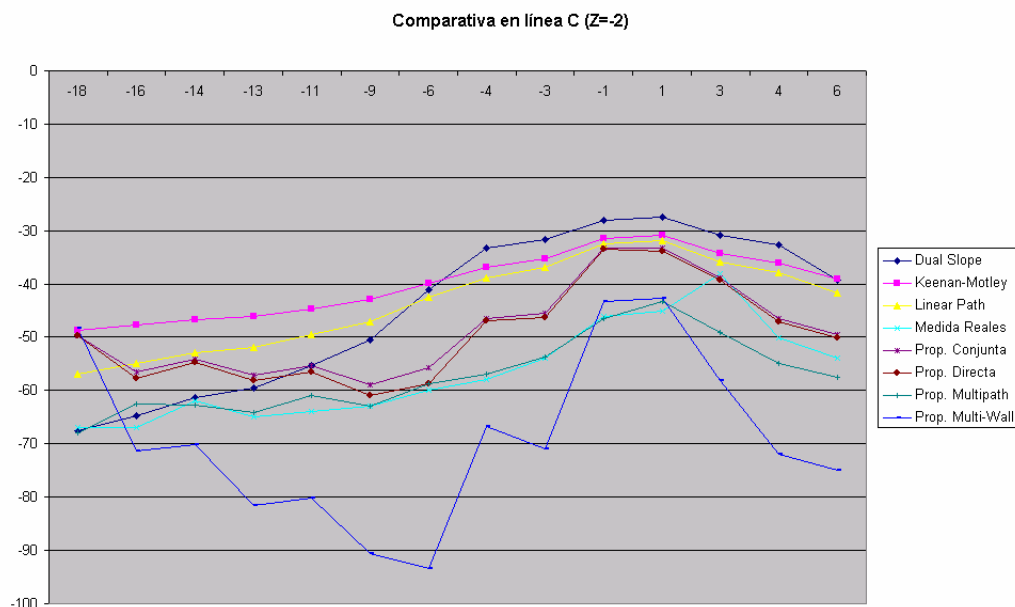


Figura 104 Gráfico de resultados ZonaWiFi — Bajocubierta Línea C

En la *Tabla 11* se muestran las medias de las desviaciones de los resultados en los distintos modelos, respecto a los datos reales medidos en los sensores de la línea C.

Unidades: dBm	Directa	Multi-trayecto	Conjunta (tesis)	Multi-Wall	Linear-Path	Dual-Slope	Keenan-Motley
Media de las desviaciones	-7,5	0,15	-8,37	11,20	-13,3	-12,4	-16,96
Media del valor absoluto de las desviaciones	7,62	2,61	8,49	14,2	13,3	12,4	17

Tabla 11 Desviaciones de intensidad de señal respecto a medidas reales (Bajocubierta - Línea C)

En este caso, los mejores valores los obtiene el método Multitrayecto. En esta línea se cubren una serie de estancias pequeñas (aseos) y todos los sensores tienen algún obstáculo.

La señal medida es sensiblemente inferior a la mayoría de los modelos y quizá se pueda explicar porque la señal atraviesa los muros con un ángulo muy pequeño, y por lo tanto la atenuación es mayor.

### 10.2.3.4 Bajocubierta: Línea D

En el gráfico de la *Figura 105* se muestran gráficamente los valores en la línea D de la *Figura 101*, que corresponden a sensores con la coordenada X= 13. (Los valores numéricos están en la *Tabla 42* del *Anexo B*).

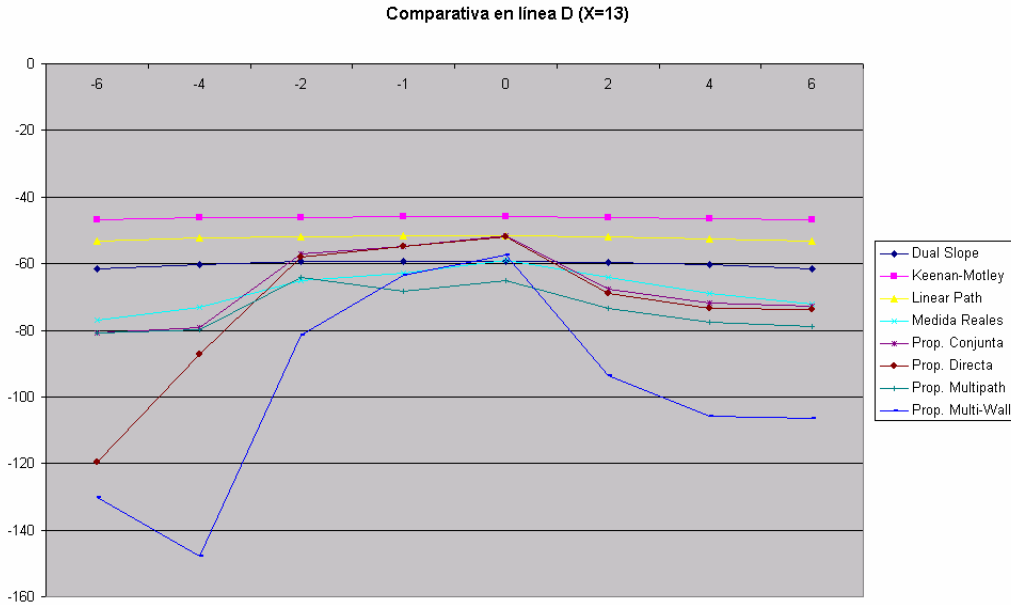


Figura 105 Gráfico de resultados ZonaWiFi — Bajocubierta Línea D

En la *Tabla 12* se muestran las medias de las desviaciones de los resultados en los distintos modelos, respecto a los datos reales medidos en los sensores de la línea D.

Unidades: dBm	Directa	Multi-trayecto	Conjunta (tesis)	Multi-Wall	Linear-Path	Dual-Slope	Keenan-Motley
Media de las desviaciones	21,44	8,51	6,69	34,56	-18,6	-9,36	-25,56
Media del valor absoluto de las desviaciones	22,22	8,51	7,67	34,56	18,6	9,36	25,56

Tabla 12 Desviaciones de intensidad de señal respecto a medidas reales (Bajocubierta - Línea D)

Los mejores valores los obtiene el método propuesto en esta tesis. En esta línea los sensores se encuentran bastante separados del punto de acceso, y la señal debe atravesar numerosos muros, y algunos muy gruesos.

### 10.2.3.5 Bajocubierta: Línea E

En el gráfico de la *Figura 106* se muestran gráficamente los valores en la línea E de la *Figura 101*, que corresponden a sensores con la coordenada X= 9. (Los valores numéricos están en la *Tabla 43* del *Anexo B*).

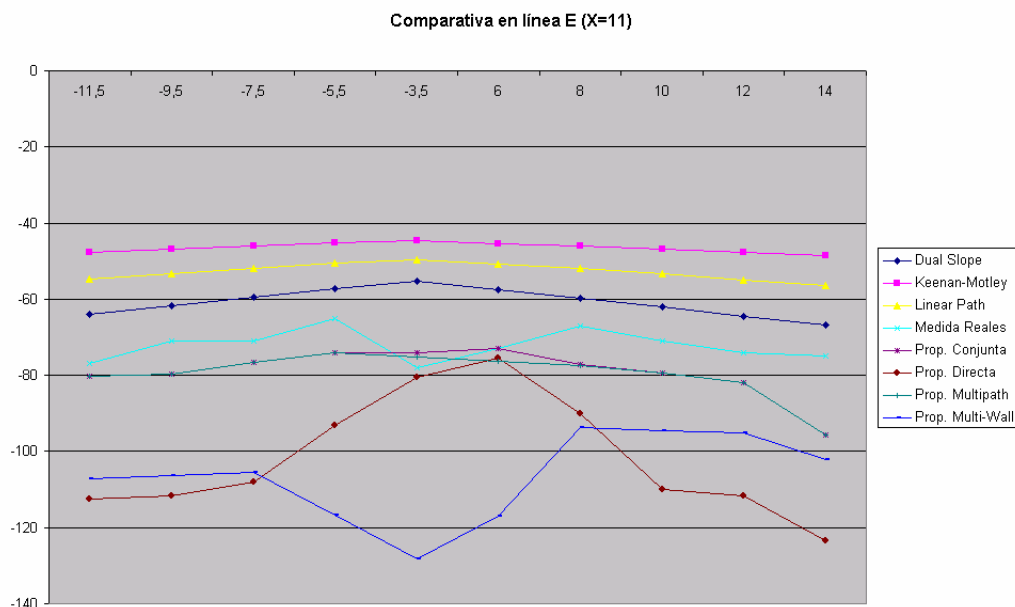


Figura 106 Gráfico de resultados ZonaWiFi — Bajocubierta Línea E

En la *Tabla 13* se muestran las medias de las desviaciones de los resultados en los distintos modelos, respecto a los datos reales medidos en los sensores de la línea E.

Unidades: dBm	Directa	Multi-trayecto	Conjunta (tesis)	Multi-Wall	Linear-Path	Dual-Slope	Keenan-Motley
Media de las desviaciones	29,49	7,45	6,96	34,43	-19,45	-11,37	-25,71
Media del valor absoluto de las desviaciones	29,49	8,04	7,79	34,43	19,45	11,37	25,71

Tabla 13 Desviaciones de intensidad de señal respecto a medidas reales (Bajocubierta - Línea E)

Los mejores valores los obtiene el método propuesto en esta tesis. En esta línea los sensores se encuentran también bastante separados del punto de acceso, y la señal debe atravesar numerosos muros, y algunos muy gruesos.

### 10.2.3.6 Bajocubierta: Línea F

En el gráfico de la *Figura 107* se muestran gráficamente los valores en la línea F de la *Figura 101*, que corresponden a sensores con la coordenada X= 9. (Los valores numéricos están en la *Tabla 44* del *Anexo B*).

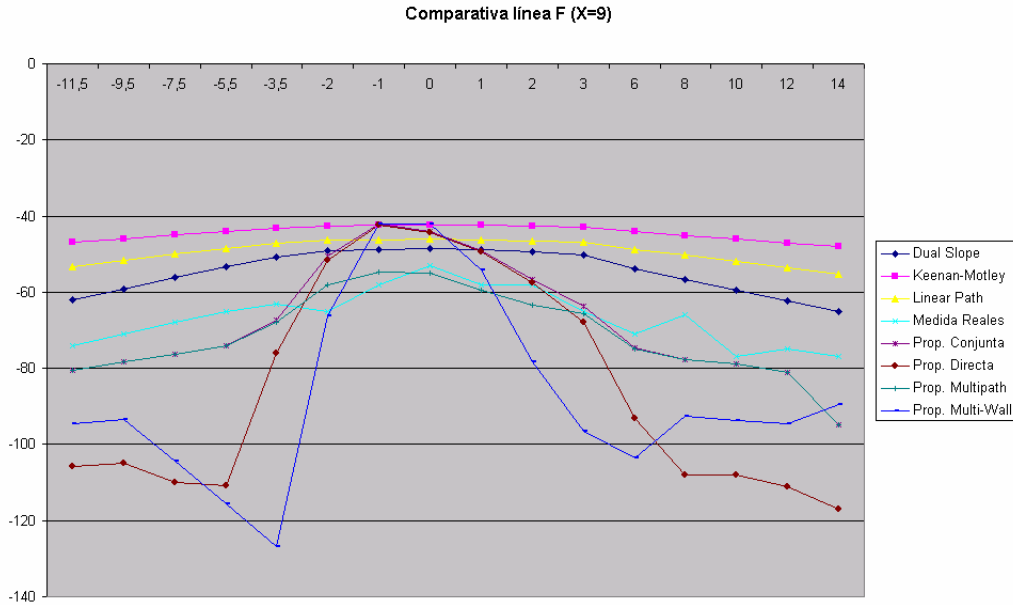


Figura 107 Gráfico de resultados ZonaWiFi — Bajocubierta Línea F

En la *Tabla 14* se muestran las medias de las desviaciones de los resultados en los distintos modelos, respecto a los datos reales medidos en los sensores de la línea F.

Unidades: dBm	Directa	Multi-trayecto	Conjunta (tesis)	Multi-Wall	Linear-Path	Dual-Slope	Keenan-Motley
Media de las desviaciones	18,37	4,81	1,62	20,10	-17,19	-11,90	-22,13
Media del valor absoluto de las desviaciones	24,22	6,11	7,99	24,08	17,19	11,90	22,13

Tabla 14 Desviaciones de intensidad de señal respecto a medidas reales (Bajocubierta - Línea F)

Los mejores valores los obtiene el método propuesto en esta tesis. En esta línea los sensores se encuentran también bastante separados del punto de acceso, y la señal debe atravesar numerosos muros, y algunos muy gruesos.

### 10.2.3.7 Bajocubierta: Línea G

En el gráfico de la *Figura 108* se muestran gráficamente los valores en la línea G de la *Figura 101*, que corresponden a sensores con la coordenada X= -11. (Los valores numéricos están en la *Tabla 45* del *Anexo B*).

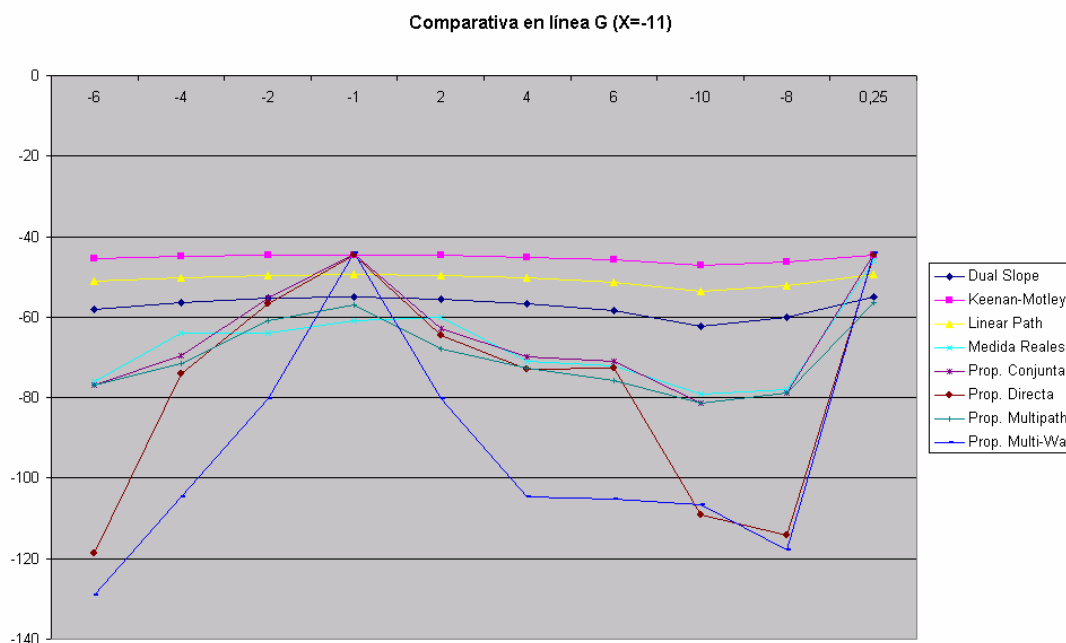


Figura 108 Gráfico de resultados ZonaWiFi — Bajocubierta Línea G

En la *Tabla 15* se muestran las medias de las desviaciones de los resultados en los distintos modelos, respecto a los datos reales medidos en los sensores de la línea G.

Unidades: dBm	Directa	Multi-trayecto	Conjunta (tesis)	Multi-Wall	Linear-Path	Dual-Slope	Keenan-Motley
Media de las desviaciones	10,08	2,83	-1,67	24,54	-16,43	-9,84	-21,83
Media del valor absoluto de las desviaciones	15,15	4,25	4,22	28,30	17,11	11,64	21,83

Tabla 15 Desviaciones de intensidad de señal respecto a medidas reales (Bajocubierta - Línea G)

Los mejores valores los obtiene el método propuesto en esta tesis. En esta línea los sensores se encuentran también bastante separados del punto de acceso, y la señal debe atravesar numerosos muros, excepto en la coordenada Z=-1.

### 10.2.3.8 Bajocubierta: Línea H

En el gráfico de la *Figura 109* se muestran gráficamente los valores en la línea H de la *Figura 101*, que corresponden a sensores con la coordenada X= -14. (Los valores numéricos están en la *Tabla 46* del *Anexo B*).

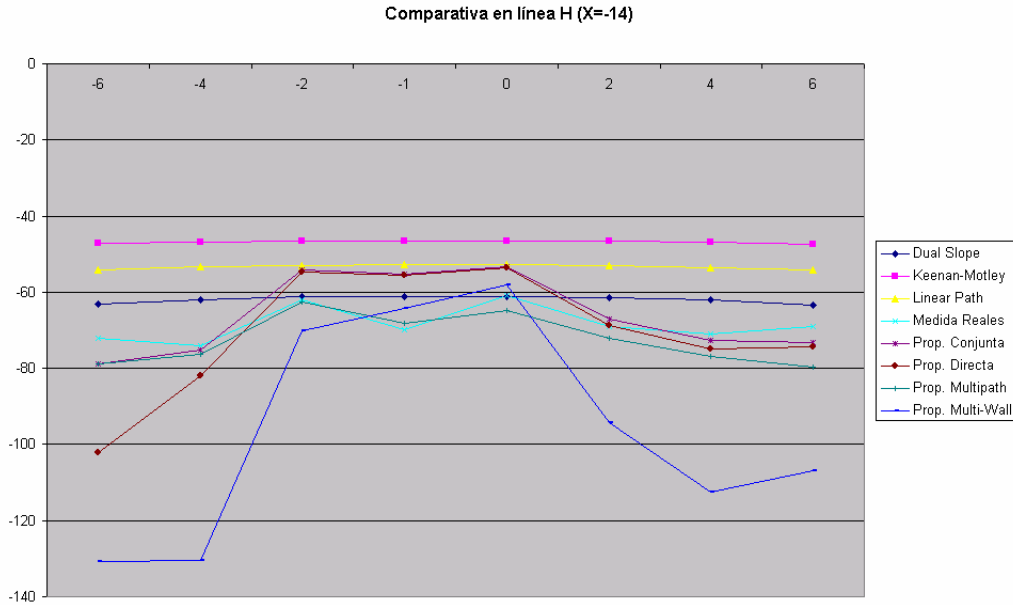


Figura 109 Gráfico de resultados ZonaWiFi — Bajocubierta Línea H

En la *Tabla 16* se muestran las medias de las desviaciones de los resultados en los distintos modelos, respecto a los datos reales medidos en los sensores de la línea H.

Unidades: dBm	Directa	Multi-trayecto	Conjunta (tesis)	Multi-Wall	Linear-Path	Dual-Slope	Keenan-Motley
Media de las desviaciones	2,23	3,93	-2,28	27,39	-15,17	-6,59	-21,64
Media del valor absoluto de las desviaciones	9,62	4,41	5,80	29,58	15,17	6,61	21,64

Tabla 16 Desviaciones de intensidad de señal respecto a medidas reales (Bajocubierta - Línea H)

Los mejores valores los obtiene el método propuesto en esta tesis. En esta línea los sensores se encuentran también bastante separados del punto de acceso, y la señal debe atravesar numerosos muros.

### 10.2.3.9 Bajocubierta: Línea J

En el gráfico de la *Figura 109* se muestran gráficamente los valores en la línea J de la *Figura 110*, que corresponden a sensores con la coordenada X= -18. (Los valores numéricos están en la *Tabla 47* del *Anexo B*).

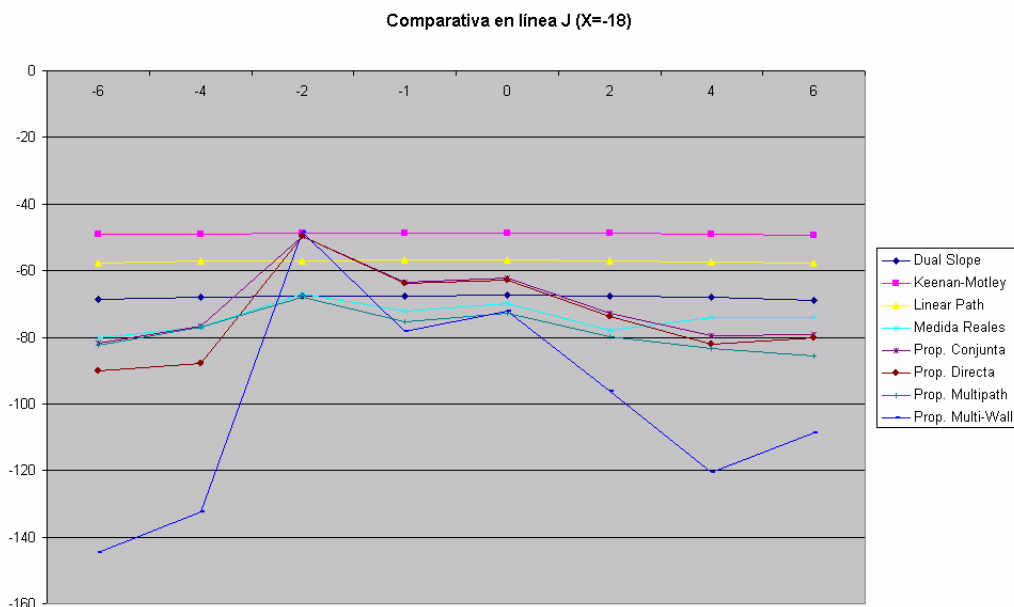


Figura 110 Gráfico de resultados ZonaWiFi — Bajocubierta Línea J

En la *Tabla 17* se muestran las medias de las desviaciones de los resultados en los distintos modelos, respecto a los datos reales medidos en los sensores de la línea J.

Unidades: dBm	Directa	Multi-trayecto	Conjunta (tesis)	Multi-Wall	Linear-Path	Dual-Slope	Keenan-Motley
Media de las desviaciones	-0,20	4,04	-3,29	26,17	-16,81	-6,0	-25,07
Media del valor absoluto de las desviaciones	9,03	4,04	6,45	30,85	16,81	6,15	25,07

Tabla 17 Desviaciones de intensidad de señal respecto a medidas reales (Bajocubierta — Línea J)

Los mejores valores los obtiene el método propuesto en esta tesis. En esta línea, los sensores se encuentran también bastante separados del punto de acceso, y la señal debe atravesar numerosos muros.



### 10.2.3.10 Resultados comparados

En este apartado, vamos a ir comparando los resultados de los modelos de predicción implementados en el prototipo, con los resultados reales medidos.

#### 10.2.3.10.1 Propagación Directa

Se calcula teniendo en cuenta la pérdida en espacio libre añadiendo las pérdidas por atravesar obstáculos que dependen del tipo de material de cada uno de ellos.

En la simulación de propagación directa mostrada en la *Figura 111* se han utilizado los siguientes parámetros:

Configuración de propagación Directa		
Path loss en $d_0 = 1$ metro		43 dB
Path loss exponente (n)		2.04
$X\sigma$		2.53
Configuración de materiales		
Suelo	Atenuación	25 dB
	Reflectividad	80 %
Muro muy grueso	Atenuación	25 dB
	Reflectividad	70 %
Muros finos	Atenuación	6 dB
	Reflectividad	60 %
Puerta de madera	Atenuación	3 dB
	Reflectividad	40 %

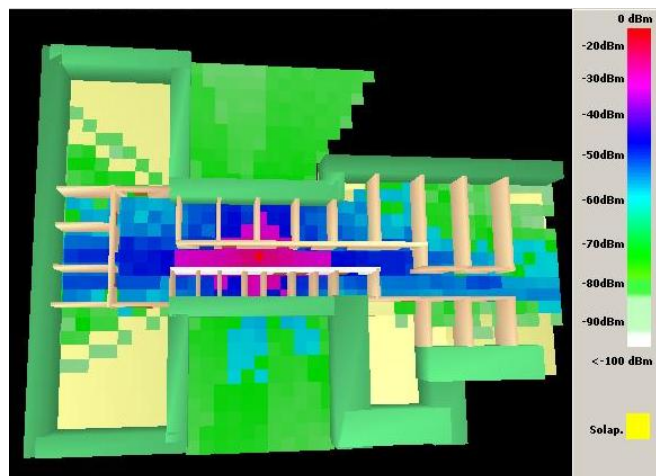


Figura 111 Cobertura calculada por propagación directa

Al mostrar únicamente los valores comparados con las medidas de campo tomadas, se aprecian las diferencias:

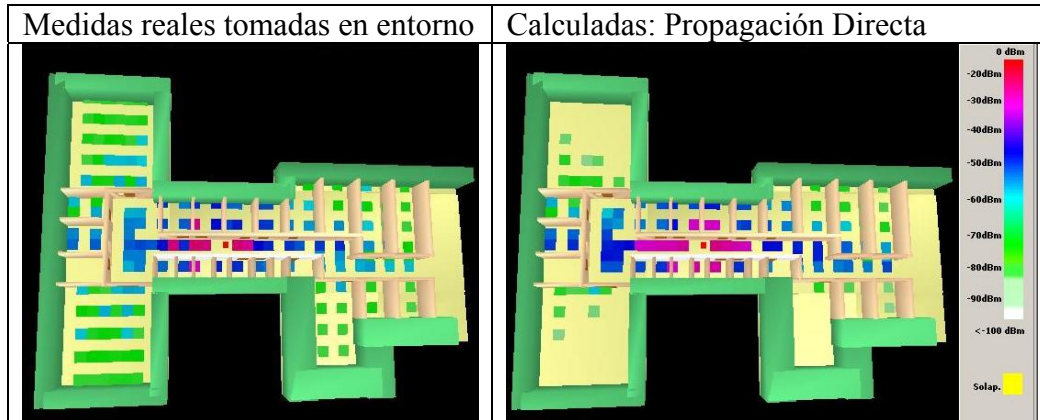


Tabla 18 Comparativa Propagación directa — Datos reales

Como se puede ver en las imágenes, las predicciones del modelo de propagación directa, son bastante cercanas a los valores reales a corta distancia cuando el número de muros no es muy alto. Sin embargo, cuando la señal atraviesa un número de muros elevado, los resultados calculados son inferiores a los datos reales.

Las desviaciones respecto a datos de medición reales se muestra en la *Tabla 19*

Unidades: dBm	Directa	
Media de las desviaciones		10,7
Media del valor absoluto de las desviaciones		15,9

Tabla 19 Desviaciones de intensidad de señal Directa respecto a medidas reales (Bajocubierta)

### 10.2.3.10.2 Propagación MultiWall

En la simulación de propagación MultiWall mostrada en la *Figura 112* se han utilizado los siguientes parámetros:

Configuración de propagación MultiWall	
Path loss en d0 = 1 metro	43 db
Atenuación suelo	25 db
Atenuación muros	6 db

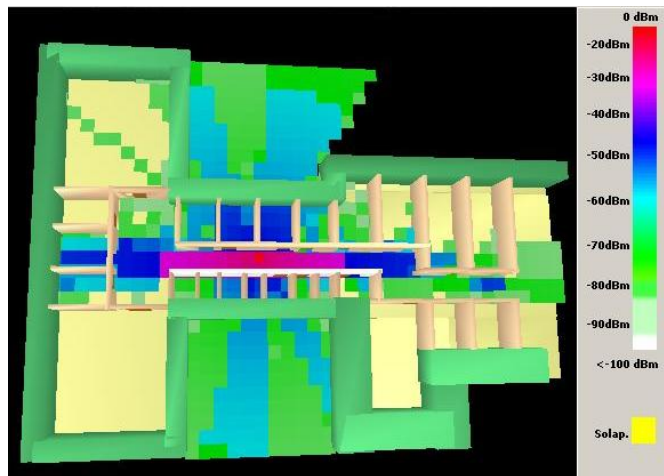


Figura 112 Cobertura calculada por propagación MultiWall

Como se puede observar, al igual que sucedía con la propagación directa, en las zonas en las que se atraviesan varios muros no llega la señal. Este modelo funciona bien cuando hay pocos obstáculos que atravesar, y todos los obstáculos son similares.

Medidas reales tomadas en entorno	Calculadas: Propagación Multiwall

Tabla 20 Comparativa Propagación Multiwall — Datos reales

Con la misma atenuación por muro atravesado que la propagación directa, las intensidades de señal calculadas son inferiores. Y hay grandes zonas en las que la señal calculada no llega, cuando realmente sí llega la señal.

21 Las desviaciones respecto a datos de medición reales se muestra en la *Tabla*

Unidades: dBm	Multi-Wall
Media de las desviaciones	21,91
Media del valor absoluto de las desviaciones	24,6

**Tabla 21 Desviaciones de intensidad de señal Multi-wall respecto a medidas reales (Bajocubierta)**

### 10.2.3.10.3 Propagación Linear Path

En la simulación de propagación Linear-Path mostrada en la *Figura 113* se han utilizado los siguientes parámetros:

Configuración de propagación Linear-Path	
Path loss en d0 = 1 metro	43 db
Coefficiente de atenuación lineal	0.47 dB/m

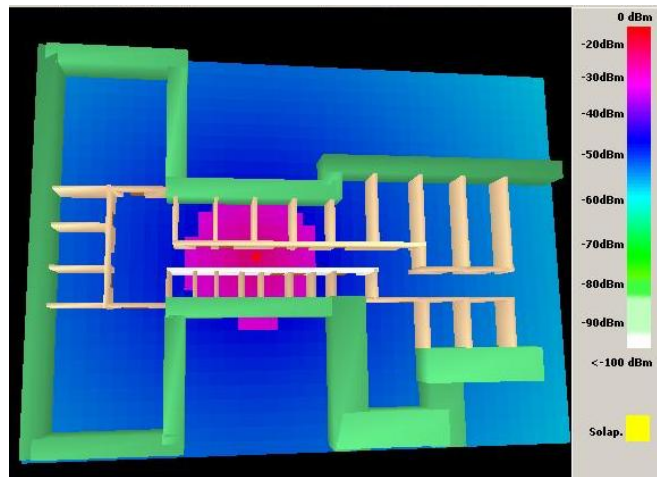


Figura 113 Cobertura calculada por propagación Linear-Path

Comparando con datos reales, vemos que la señal calculada es muy superior a la real.

Se ha utilizado el coeficiente de atenuación lineal propuesto por los diseñadores del modelo para un ambiente de oficinas ( $a=0.47$ ), y aparentemente no es correcto en nuestro caso; pero el problema está precisamente en cómo calcular el coeficiente de atenuación lineal correcto.

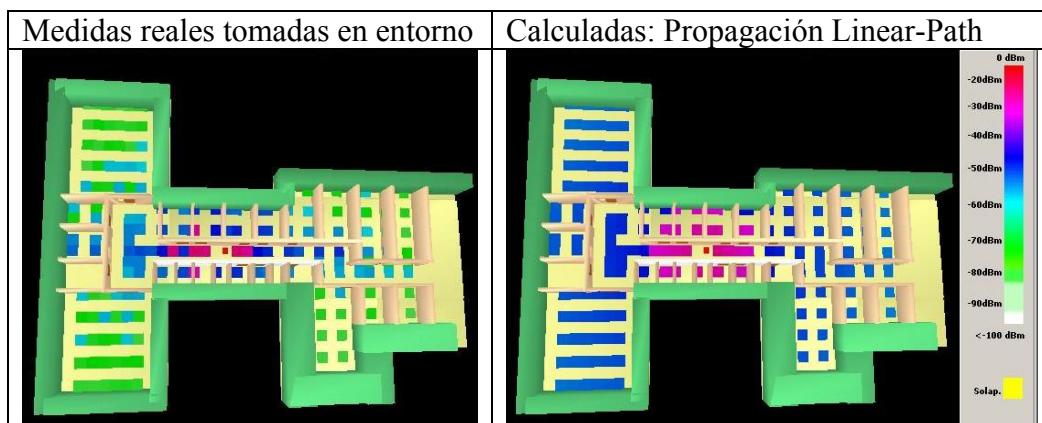


Tabla 22 Comparativa Propagación Linear Path — Datos reales

Las desviaciones respecto a datos de medición reales se muestra en la *Tabla*

Unidades: dBm	Linear-Path
Media de las desviaciones	-15,5
Media del valor absoluto de las desviaciones	15,9

Tabla 23 Desviaciones de intensidad de señal Linear-Path respecto a medidas reales (Bajocubierta)

Si cambiamos el coeficiente de atenuación aumentándolo hasta 2.2 dB/m se obtienen unos resultados mejores; pero lo hemos obtenido probando hasta que los resultados de predicción han sido aceptables.

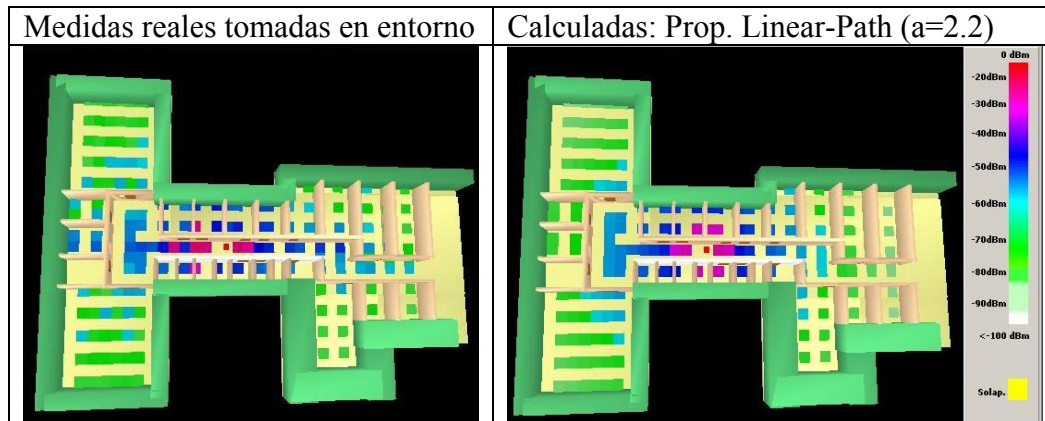


Tabla 24 Comparativa Propagación Linear Path (corregida) — Datos reales

### 10.2.3.10.4 Propagación Dual Slope

Los parámetros utilizados en la simulación de la *Figura 114* son los de la siguiente tabla:

Configuración de propagación Dual-Slope	
Path loss en d0 = 1 metro	43 db
Distancia de ruptura dbr	5
Path Loss exponente n1	2
Path Loss exponente n2	6
Diferencia con Free-Space	0
Longitud de onda	0.13 m

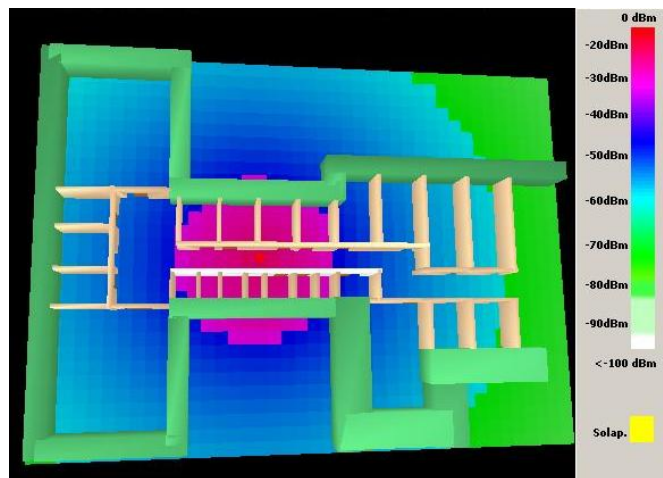


Figura 114 Cobertura calculada por propagación Dual-Slope

Al igual que sucedía con el modelo de propagación *Linear-path*, la señal calculada es muy superior a la señal real medida. Lo que nos lleva, a que los parámetros utilizados no son correctos.

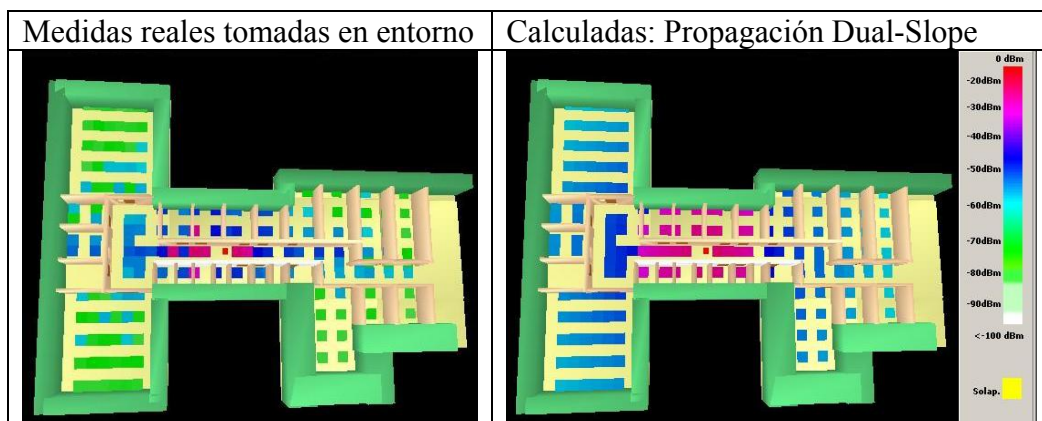


Tabla 25 Comparativa Propagación Dual Slope — Datos reales

Las desviaciones respecto a datos de medición reales se muestra en la *Tabla*

Unidades: dBm	Dual-Slope
Media de las desviaciones	-10,8
Media del valor absoluto de las desviaciones	11,2

Tabla 26 Desviaciones de intensidad de señal Dual-Slope respecto a medidas reales (Bajocubierta)

Se ha probado haciendo cambios hasta que se han obtenido resultados aceptables. La configuración del punto de ruptura se ha establecido en 2 metros, y así se obtienen los resultados de la comparativa en la *Tabla 27*.

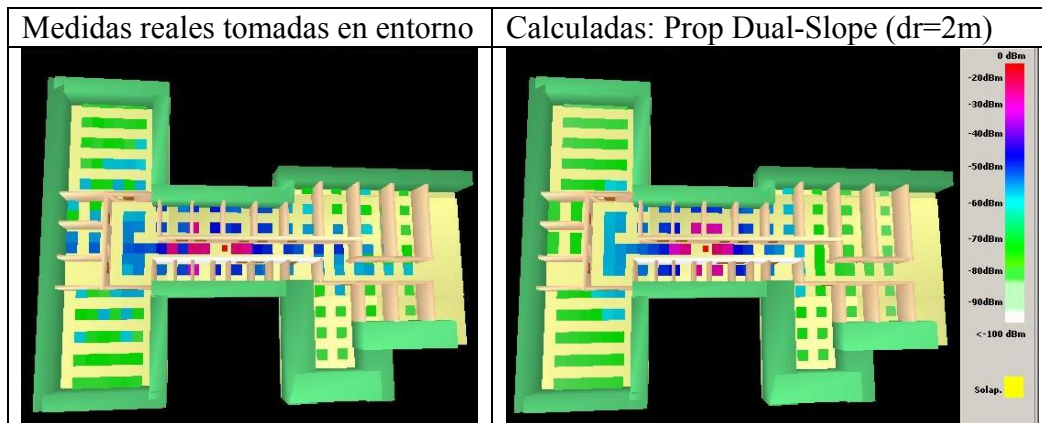


Tabla 27 Comparativa Propagación Dual Slope (corregida) — Datos reales



### 10.2.3.10.5 Propagación Keenan-Motley

El único parámetro utilizado en la simulación de la *Figura 115* es el de la siguiente tabla:

Configuración de propagación Keenan-Motley	
Path loss en d0 = 1 metro	43 db

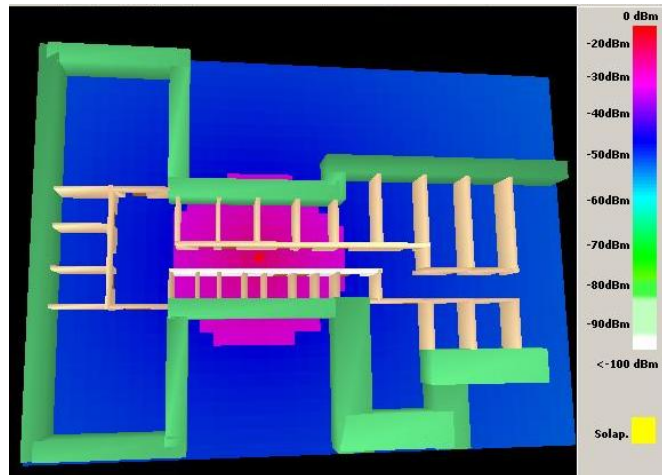


Figura 115 Cobertura calculada por propagación Keenan-Motley

Los valores calculados son muy superiores a los valores reales medidos, como se puede ver en la comparativa de la *Tabla 28*.

En este caso no hay posibilidad de corregir los parámetros, puesto que no se atraviesan suelos, y la pérdida a un metro, es un dato medido objetivo.

Este modelo de propagación no es aceptable en entornos como el que estamos usando, en los que hay muchos muros internos y la geometría es complicada.

Medidas reales tomadas en entorno	Calculadas: Propagación Keenan-Motley

Tabla 28 Comparativa Propagación Keenan-Motley — Datos reales

Las desviaciones respecto a datos de medición reales se muestra en la *Tabla*

Unidades: dBm	Keenan- Motley
Media de las desviaciones	-20,52
Media del valor absoluto de las desviaciones	20,8

**Tabla 29 Desviaciones de intensidad de señal Keenan-Motley respecto a medidas reales (Bajocubierta)**

### 10.2.3.10.6 Propagación Multitrayecto

Este modelo es el propuesto en la tesis: *basado en radiosidad por refinamiento progresivo*, aunque para abreviar se le llama *multitrayecto*.

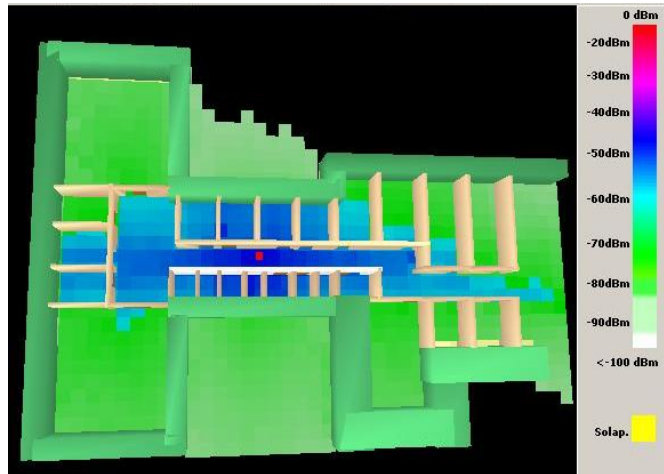


Figura 116 Cobertura calculada por reflexiones utilizando radiosidad por refinamiento progresivo

Se aprecia en la *Figura 116* que no existen valores elevados de señal en las proximidades del punto de acceso; lo cual se explica porque sólo se tienen en cuenta las señales reflejadas.

Si comparamos con los datos de campo reales (*Tabla 30*), vemos que mediante este método, se cubren las zonas en las que la propagación directa no llegaba; precisamente por la atenuación provocada por los muros. Si no se contabilizasen las señales reflejadas, serían zonas de sombra.

Medidas reales tomadas en entorno	Calculadas: Propagación Multitrayecto

Tabla 30 Comparativa Propagación Multitrayecto — Datos reales

En este caso, las medidas calculadas son muy similares a las medidas reales, sin embargo, al contabilizar únicamente la señal reflejada, la señal calculada en las zonas próximas al punto de acceso, resultan sensiblemente inferiores a las reales.

31 Las desviaciones respecto a datos de medición reales se muestra en la *Tabla*

Unidades: dBm	Multi- trayecto
Media de las desviaciones	5,83
Media del valor absoluto de las desviaciones	6,36

**Tabla 31** Desviaciones de intensidad de señal Multitrayecto respecto a medidas reales (Bajocubierta)

### 10.2.3.10.7 Propagación Conjunta

Este no es un modelo de propagación, propiamente dicho, sino una combinación del modelo propuesto en la tesis, *Multitrayecto*, y del método de *propagación directa*, en el que se suman las energías obtenidas por cada uno de ellos.

La justificación de la combinación de las señales obtenidas por propagación directa junto a las obtenidas mediante radiosidad por refinamiento progresivo, es precisamente solventar los errores que se generan en cada una por separado.

La solución adoptada de sumar las energías, puede ser discutible, y no se descartan otras fórmulas, como seleccionar el valor más alto, o establecer puntos de corte en los que se cambie el método de cálculo. Pero esta discusión se deja para posteriores investigaciones.

La señal calculada sumando las energías se puede ver en la *Figura 117*

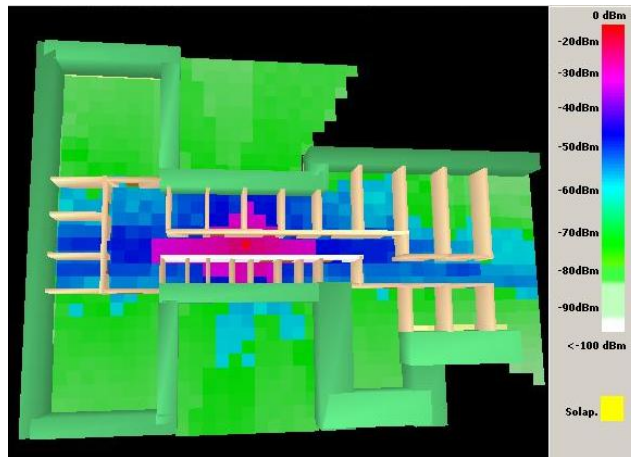


Figura 117 Cobertura calculada por propagación conjunta

Si comparamos los resultados con las medidas de campo (*Tabla 32*), vemos que son bastante parecidas a las medidas reales.

Medidas reales tomadas en entorno	Calculadas: Propagación Conjunta

Tabla 32 Comparativa Propagación Conjunta — Datos reales

En distancias cortas, parece que hay demasiada señal, pero se debe tener en cuenta el efecto túnel que tiene lugar en el pasillo en el que está situado el punto de acceso, que hace que las señales medidas varíen de forma un tanto extraña: hay menos intensidad de señal en lugares más cercanos.

Las desviaciones respecto a datos de medición reales se muestra en la *Tabla 33*

Unidades: dBm	Conjunta (tesis)	
Media de las desviaciones		0,52
Media del valor absoluto de las desviaciones		6,3

**Tabla 33** Desviaciones de intensidad de señal Conjunta respecto a medidas reales (Bajocubierta)

# CAPÍTULO 11

## CONCLUSIONES

---

---

### 11.1 Discusión general

El modelo de cobertura basado en *radiosidad por refinamiento progresivo* se ha diseñado para que tenga en cuenta el efecto de las reflexiones de la señal en los obstáculos que encuentra a su paso. Utiliza una técnica conocida y probada en representación realista de imágenes, pero que **nunca** había sido utilizada para el cálculo de cobertura en redes inalámbricas (en lo que se ha podido comprobar). Los algoritmos utilizados se simplifican por un lado respecto a los utilizados para representación realista de imágenes, al tener en cuenta una única frecuencia de señal en vez de las frecuencias del rango visible de luz. Pero por otro lado se complica debido a la transparencia parcial de los materiales a la propagación de las señales, lo cual amplía la zona de aplicación.

Las señales reflejadas se calculan conjuntamente mediante el algoritmo iterativo que implementa la *radiosidad por refinamiento progresivo*, dando lugar a una única señal en lo que se llama en el prototipo: medida *multitrayecto*.

En general, no es aplicable de forma aislada, si no como complemento de otro modelo de propagación que tenga en cuenta la propagación directa; en nuestro caso, y aprovechando que se dispone del modelo geométrico tridimensional de la escena, y que se tienen que establecer las características de reflectividad de cada material, se utilizan también las características de atenuación de los diferentes materiales para establecer la señal directa (no reflejada) que llega a cada sensor. El modelo de propagación directa empleado (Log-Normal Shadowing Path Loss Model) es simple; y si se selecciona un valor adecuado para la variable de pérdida de trayecto ( $n$ ), y el número de obstáculos no es elevado, da unos resultados bastante aproximados a los datos reales de cobertura.

Se ha decidido, en esta versión del prototipo, que la combinación de ambas señales, directa y multitrayecto, sea la suma de ambas señales; pero es una aproximación, puesto que la combinación de las señales pueden complementarse (si llegan en fase) o anularse en distinto grado (si llegan desfasadas). Además, variaciones muy pequeñas en el espacio pueden dar lugar a grandes variaciones de

señal, debido a las características de propagación, por lo que cualquier opción será una aproximación.

La posibilidad de llevar a cabo una tabla de medidas de campo incrementa la precisión, ajustando notablemente los resultados a la realidad. No obstante, no se puede garantizar la precisión absoluta del mismo, debido al enorme número de factores que pueden intervenir en la propagación de la señal y a que, al ser utilizadas medidas empíricas, se depende del grado de fiabilidad de las mismas.

En resumen, el modelo proporciona unas predicciones de cobertura aceptables, que comparadas con las predicciones de los otros modelos estudiados, y aplicadas a entornos reales, resultan más ajustadas a los datos reales obtenidos mediante medidas de campo.

## 11.2 Algunos resultados destacables

Se ha diseñado un modelo de cobertura utilizando una técnica, *radiosidad por refinamiento progresivo*, ya estudiada en otros campos, pero que nunca se había aplicado para el cálculo de cobertura en redes inalámbricas; a pesar de las similitudes de los campos de aplicación.

En el modelo de cobertura propuesto, se utilizan modelos geométricos diseñados utilizando herramientas clásicas de modelado, ampliamente utilizadas; y que permiten importar incluso los planos de los edificios para la obtención del modelo geométrico del entorno, lo que permite planificar la instalación de redes inalámbricas previamente a la construcción del propio edificio; e incluir en su construcción por ejemplo, el cableado para los puntos de acceso.

Las características de los materiales son configurables y se pueden adaptar a los materiales reales del entorno en el que se quieren realizar los cálculos. Los puntos de acceso y las características de propagación de la antena también son configurables y se pueden adaptar al modelo o modelos de puntos de acceso y de las antenas. Estas características, en conjunto, suponen una gran ventaja respecto a modelos genéricos.

Utilizando únicamente el modelo de propagación *Multitrayecto* en entornos con muchos obstáculos, se podrían considerar aceptables los resultados, ya que la señal directa se vería completamente atenuada por el número de obstáculos atravesados, y precisamente en esas zonas de cobertura, tendrían más peso las señales reflejadas. A corta distancia, la cobertura calculada sería inferior a la real, pero a efectos de planificar la colocación de puntos de acceso, no supondría ningún problema, porque los problemas de cobertura siempre están en los límites del campo de acción, no en las proximidades al punto de acceso.

En entornos abiertos con pocos obstáculos, es necesario complementar la propagación *multitrayecto*, con algún método de propagación *directa*.

El modelo se comporta correctamente en la propagación directa, teniendo en cuenta los obstáculos que encuentran las señales y las características de los materiales de los que están compuestos.



El modelo se comporta correctamente en el cálculo de señales reflejadas con un coste computacional considerablemente inferior a modelos determinísticos (p.e. ray-tracing), y con una necesidad de precisión en el entorno geométrico tridimensional muy inferior.

En conjunto, el modelo propuesto mejora los resultados de los otros modelos de propagación, sobre todo en situaciones en las que influyen mucho la disposición del entorno, los materiales de los que están compuestos, y se tiene en cuenta la forma de emitir de los puntos de acceso.

### **11.3 Conclusiones Generales**

Se utiliza la técnica de Radiosidad por Refinamiento Progresivo como base de un nuevo modelo de propagación, que nunca ha sido utilizada hasta ahora.

Los resultados del nuevo modelo de propagación son aceptables, en referencia a datos reales de cobertura tomados en entornos reales modelados.

Los resultados de predicción de la cobertura son mejores que los obtenidos con los otros modelos de propagación estudiados. Sobre todo en los casos en los que el entorno real tiene un número elevado de obstáculos.

Se utilizan Tecnologías Orientadas a Objeto para el diseño del prototipo, lo que facilita su modificación para nuevas versiones, que permitan seguir investigando sobre el tema, y aplicando el modelo propuesto a los nuevos estándares que van a ir surgiendo en el dinámico campo de las redes inalámbricas.

### **11.4 Conclusiones Particulares**

En este apartado iremos obteniendo las conclusiones en cada caso de prueba tanto teórico como real. En el caso de los casos de prueba teóricos nos referiremos a cómo el prototipo cumple con los resultados teóricos esperados. Y en los casos de prueba reales, nos referiremos a cómo en cada caso de prueba el modelo es aceptable, y en qué grado lo es.

#### **11.4.1 Pruebas teóricas**

Al ser pruebas teóricas no existen observaciones reales que nos permitan decir cuáles de los modelos son aceptables en base a que se ajusten a la realidad.

- Caso 1: Prueba de Propagación sin obstáculos.

En todos los modelos de propagación implementados, el prototipo proporciona unos resultados similares a los obtenidos de forma teórica. Las desviaciones son del orden de una cienmilésima de dB en los modelos Multi-Wall, Linear-Path, Dual-Slope y Keenan-Motley, y están debidas a errores de redondeo por la diferente precisión utilizada en los cálculos teóricos y en el prototipo.

En el modelo de propagación directa, la desviación media de 0,81 dB es debida a que en los cálculos teóricos no se ha considerado la variable aleatoria  $X_{\sigma}$ , que evidentemente sí se considera en el prototipo.

En el modelo Multitrayecto, los resultados son coherentes con las condiciones teóricas. Como el suelo se ha considerado sin reflexión de señal, sólo se detecta señal reflejada en las proximidades al muro (que sí refleja), y con una intensidad muy baja debido a la distancia existente desde el punto de acceso.

En el modelo de propagación conjunta, los resultados son coherentes con la propagación directa y multitrayecto de cuyas señales es la suma.

Se puede concluir que el prototipo implementa correctamente los modelos produciendo resultados aceptables.

Respecto a las comparativas conjuntas (tanto de resultados teóricos como obtenidos en el prototipo) se puede concluir que los resultados en los modelos de propagación Directa, Multi-wall y Keenan-Motley son muy similares, y difieren considerablemente de los modelos de propagación Linear-Path y Dual-Slope, que también difieren entre sí, lo que hace pensar que en alguno de los casos los parámetros de configuración no son correctos.

En todos los casos los resultados son coherentes con las condiciones teóricas reales, ya que al no haber obstáculos, las diferencias de señal no son suficientes como para decir que algún modelo no es válido.

Al no tener datos reales no se puede concluir cuáles son los modelos aceptables y cuáles no.

- Caso 2: Prueba de Propagación (Claustro).

En los modelos de propagación implementados en los que no se tienen en cuenta el número de muros, el prototipo proporciona unos resultados similares a los obtenidos de forma teórica. Las desviaciones son inferiores a una centésima de dB en los modelos Linear-Path, Dual-Slope y Keenan-Motley, y están debidas a errores de redondeo por la diferente precisión utilizada en los cálculos teóricos y en el prototipo.

En los modelos en los que se tienen en cuenta los muros atravesados, existen errores en algunos sensores porque en los cálculos teóricos se ha considerado que el sensor estaba a un lado de un muro, y el prototipo considera que el sensor está al otro lado, o incluso dentro del muro.

En el modelo de propagación directa, también existe desviación porque no se considera en los cálculos teóricos la variable aleatoria  $X_{\sigma}$ .

En el modelo de Multitrayecto, los resultados son coherentes con las condiciones teóricas. En el interior del claustro no llega señal suficiente para ser reflejada debido a la alta absorción de los muros (de forma coherente con los

resultados de propagación directa). Por los pasillos laterales y del fondo, llega señal debido a la alta reflectividad de los muros y suelo.

En el modelo de propagación conjunta, los resultados son coherentes con la propagación directa y multitrayecto de cuyas señales es la suma.

Se puede concluir que el prototipo implementa correctamente los modelos produciendo resultados aceptables.

Respecto a las comparativas conjuntas (tanto de resultados teóricos como obtenidos en el prototipo) se puede concluir lo siguiente:

Los modelos Linear-Path, Dual-Slope y Keenan-Motley no son aceptables en el caso de la línea B, porque en el interior del claustro indican que hay unos niveles de señal que se contradicen con los resultados que debían darse teóricamente, según las condiciones de absorción de los muros.

Los resultados en los modelos de propagación Directa, Multi-wall son coherentes con los conocimientos teóricos en la línea B; pero no es así en la línea A, ya que los conocimientos teóricos nos indican que en los pasillos laterales debería haber señal, y no la hay.

El único modelo que es coherente con los conocimientos teóricos es el modelo propuesto en esta tesis: Propagación Conjunta.

Al no tener datos reales no se puede concluir cuáles son los modelos aceptables y cuáles no en base a la condición de que sean coherentes con datos reales.

- Caso 3.1: Pruebas de Propagación Directa sin Obstáculos: Influencia de  $n$  y  $X_{\sigma}$ .

El prototipo obtiene resultados correctos respecto a la influencia de modificaciones en los parámetros  $n$  y  $X_{\sigma}$ .

- Caso 3.2.1: Pruebas de Propagación Directa con Obstáculos: Doble Pasillo (diferentes índices de penetración).

El prototipo obtiene resultados correctos respecto a las modificaciones en los índices de penetración.

- Caso 3.2.5: Pruebas de Propagación Directa con obstáculos: Entorno de Varias Plantas.

El prototipo obtiene resultados correctos respecto al efecto de un entorno con múltiples plantas.

- Caso 3.2.6: Pruebas de Propagación Directa con obstáculos: Configuración de los parámetros del punto de acceso.

El prototipo obtiene resultados correctos respecto al efecto de modificar los parámetros de propagación de los puntos de acceso: la potencia de emisión, y la directividad de propagación.

- Caso 3.2.7: Pruebas de Propagación Directa con obstáculos: Solapamiento de hasta 3 canales.

El prototipo obtiene resultados correctos cuando existen zonas bajo la influencia de hasta 3 puntos de acceso, mostrando la señal más fuerte de las que le llegan.

- Caso 3.2.8: Pruebas de Propagación Directa con obstáculos: Solapamiento de más de 3 canales.

El prototipo obtiene resultados correctos cuando existen zonas bajo la influencia de más de 3 puntos de acceso, mostrando las zonas en las que se producen interferencias.

- Caso 4: Pruebas de Propagación Multi-Wall.

El prototipo obtiene resultados correctos respecto a la influencia de muros y suelos teniendo en cuenta las configuraciones de absorción establecidas en sus parámetros.

El prototipo obtiene resultados correctos respecto a la influencia del  $PL(d_0)$  y a la potencia de emisión del punto de acceso.

- Caso 5: Pruebas de Propagación Linear-Path.

El prototipo obtiene resultados correctos respecto a la influencia de variaciones en el coeficiente de atenuación lineal, la influencia del  $PL(d_0)$  y a la potencia de emisión del punto de acceso.

- Caso 6: Pruebas de Propagación Dual-Slope.

El prototipo obtiene resultados correctos respecto a la influencia de variaciones en los coeficientes  $n1$  y  $n2$ , y en la distancia de ruptura.

- Caso 7: Pruebas de Propagación Keenan-Motley.

El prototipo obtiene resultados correctos respecto a la influencia de variaciones en la atenuación de los suelos atravesados, la potencia de emisión del punto de acceso, y la influencia del  $PL(d_0)$ .

### 11.4.2 Pruebas reales

Puesto que se ha diseñado un modelo de cobertura, vamos a concluir con la verificación de que dicho modelo cumple los requisitos que debe cumplir un modelo para que sea considerado válido, tal y como habíamos visto en el *Capítulo 3*, es decir, que:

1. El modelo puede explicar las observaciones realizadas del fenómeno.
2. Se puede usar el modelo para predecir el comportamiento de fenómeno modelado.
3. El modelo es consistente con otras ideas acerca del funcionamiento del fenómeno modelado

Vamos a considerarlo para cada una de las pruebas reales realizadas, y nos vamos a centrar en el modelo propuesto en esta tesis, dejando las conclusiones de otros modelos de propagación para el siguiente apartado:

- Caso 8: Pruebas de Modelo Real (Edificio de Ciencias – Planta Baja – Punto de Acceso Central).

El modelo explica y es coherente con las observaciones reales tomadas en el entorno.

El modelo es capaz de predecir los resultados que se obtendrán.

El modelo es consistente con los comportamientos teóricos de las señales de radiofrecuencia.

Por lo tanto se puede concluir que en este caso, el modelo es válido.

- Caso 9: Pruebas de Modelo Real (Edificio de Ciencias – Planta Baja – Punto de Acceso Lateral).

En este caso en particular, y en el periodo en el que se realizaron las mediciones, había interferencias de múltiples redes inalámbricas. Se detectaban más de 6 redes inalámbricas (ajenas a nuestras pruebas e imposibles de controlar por ser de los edificios cercanos), lo que inevitablemente llevaba a que las mediciones estuvieran influidas por las interferencias de las señales en las mismas frecuencias.

En cualquier caso, se realizaron las mediciones utilizando la frecuencia que menos colisiones provocaba.

El modelo explica y es coherente con las observaciones reales tomadas en el entorno.

El modelo es capaz de predecir los resultados que se obtendrán.

El modelo es consistente con los comportamientos teóricos de las señales de radiofrecuencia.

Por lo tanto se puede concluir que en este caso, el modelo también es válido.

- Caso 10: Pruebas de Modelo Real (Edificio de Ciencias – Planta Bajocubierta).

El entorno planteado en este caso de prueba era el más complicado, debido al elevado número de muros, y a su geometría enrevesada. Por eso ha sido el que se ha estudiado más detalladamente.

El modelo explica y es coherente con las observaciones reales en la gran mayoría de los casos. Hay algunos casos en los que no lo hace exactamente, pero son raros y en sitios (pasillos) en los que están documentados fenómenos difícilmente implementables en el modelo.

El modelo es capaz de predecir los resultados que se obtendrán.

El modelo es consistente con los comportamientos teóricos de las señales de radiofrecuencia.

Por lo tanto se puede concluir que en este caso, el modelo también es válido.

### 11.4.3 Comparación con otros modelos

Si comparamos en conjunto los resultados del modelo propuesto en esta tesis, con el resto de modelos implementados en el prototipo, vemos que es el que mejor se ajusta a los resultados reales, y por tanto, es el que mejor *predice el comportamiento* de las señales de radiofrecuencia que se utilizan en las redes inalámbricas estudiadas.

En la gran mayoría de los casos particulares (líneas de comparación) es el modelo que *mejor se ajusta a la realidad*, y con desviaciones medias más bajas.

También se puede concluir que el modelo objeto de esta tesis es *coherente con los conocimientos teóricos*, y por lo tanto, como cumple todos los requisitos de validez de un modelo, el modelo propuesto es un *modelo válido*.

# CAPÍTULO 12

## **NUEVAS PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN**

---

---

La tesis presentada deja abiertos diferentes trabajos y líneas de investigación para mejorar y completar lo ya existente, y para desarrollar nuevas facetas.

A continuación se señalan algunas de las líneas de investigación más inmediatas relacionadas con los temas discutidos en esta tesis:

### **12.1 Trabajo y líneas de investigación futuras**

En una primera fase de investigación se plantean las siguientes líneas de investigación:

- Modelado de otros fenómenos de propagación (difracción, dispersión,...) y de otros obstáculos.
- Combinación de modelos de propagación para obtener mejores resultados.
- Localización automática de los sitios óptimos para los puntos de acceso.
- Adaptación del modelo a espacios abiertos y más extensos: uso de WiMax.

#### **12.1.1 Modelado de otros fenómenos de propagación, y de otros tipos de obstáculos**

En la propagación inalámbrica intervienen muchos fenómenos, (difracción, dispersión,...). Algunos de ellos, son fáciles de implementar en modelos de propagación, pero otros son muy complicados. Es habitual despreciar los efectos de algunos de estos fenómenos, porque la incidencia en los resultados finales, no merecen el gasto en computación y complejidad de los modelos de propagación.

En el modelo propuesto en esta tesis, se pueden implementar todo tipo de obstáculos estáticos, siempre que se definan sus límites, su ubicación, y las características de los materiales que los componen. Pero hay unos elementos que no se tienen en cuenta en los modelos de propagación: las personas.

El ser humano, como elemento compuesto mayoritariamente por agua, supone un obstáculo importante en la propagación de ondas en las frecuencias que se utilizan habitualmente; ya que el agua absorbe las microondas (igual que en los hornos microondas que trabajan en frecuencias similares). Realizar los cálculos de cobertura en áreas sin tener en cuenta las personas que van a estar o circular por ellas, supone que los resultados sean erróneos.

Una línea propuesta de investigación pretende incluir en el modelado, a las personas que van a estar o circular por las áreas que se modelan.

### **12.1.2 Combinación de modelos de propagación**

De la investigación realizada en el modelo propuesto, se ha visto la necesidad de combinar diferentes modelos para obtener resultados realistas.

En esta tesis se plantea la combinación de los modelos de propagación directa, junto a radiosidad por refinamiento progresivo; y la combinación que plantea es la suma de las energías calculadas con ambos modelos.

También hay modelos de los estudiados que consideran que a diferentes distancias, el comportamiento de la propagación es diferente.

Se plantea una nueva línea de investigación orientada a continuar con el estudio de la combinación de métodos, además de la utilización de un punto de ruptura para diferenciar el lugar de aplicación de los modelos. La idea de partida puede ser establecer un punto de ruptura en el que se cambie la forma de combinación de diversos métodos.

### **12.1.3 Ubicación automática de los sitios óptimos para puntos de acceso**

La ubicación de puntos de acceso no es un problema fácil de resolver. Se depende de muchos factores, y siempre va a ser necesario realizar comprobaciones en el lugar concreto de aplicación. Si utilizando diversos modelos de propagación se pudiese descubrir cuáles son las mejores ubicaciones para los puntos de acceso; y si además se pudiese hacer sin tener que desplazarse al sitio concreto más que para realizar las comprobaciones de que los resultados son correctos, sería una gran ayuda para instaladores y diseñadores de redes.



Una línea de investigación pretende utilizar los métodos de propagación propuestos en esta tesis, junto a posibles variantes y/o modificaciones, para obtener la situación óptima de puntos de acceso, que proporcionen la cobertura suficiente en todo el entorno.

#### **12.1.4 Adaptación del modelo a espacios abiertos. Uso de WiMax**

La previsible generalización del uso de WiMax como medio de enlace a Internet de “última milla”, invita a su estudio. Teniendo en cuenta que es posible que la señal deba llegar al interior de las casas, se plantea el estudio del modelo propuesto en esta tesis, aplicado a la propagación específica de WiMax.



# CAPÍTULO 13

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [AA98] Stig Erik Arnesen & Kjell Åge Håland. “Modelling of coverage in WLAN”. Agder University College. 2001.
- [And04] ANDELMAN, D, “5GHz WLAN Indoor Coverage Range: Truths and Misconceptions”, (2004)
- [Boo94] Grady Booch. Object-Oriented Analysis and Design with Applications, 2<sup>nd</sup> edition. Benjamín Cummings. 1994. Versión en español: Análisis y Diseño Orientado a Objetos con Aplicaciones, 2ª edición. Addison-Wesley/Díaz de Santos. 1996.
- [Bos99] M. Bosque. “Método para la Descripción de Reflexiones Difusas: Radiosidad” PFC EUITIO, Universidad de Oviedo. 1999.
- [BRJ99a] Grady Booch, James Rumbaugh, Ivan Jacobson. The Unified Modeling Language User Guide. Addison-Wesley. 1999. Versión en español: El Lenguaje Unificado de Modelado. Addison-Wesley. 1999.
- [BRJ99b] Grady Booch, James Rumbaugh, Ivan Jacobson. The Unified Modeling Language Reference Manual. Addison-Wesley. 1999. Versión en español: El Lenguaje Unificado de Modelado. Manual de Referencia. Addison-Wesley. 2000.
- [Bul77] K. Bullington, “Radio Propagation for Vehicular Communications”, IEEE Trans.Vehic. Tech., vol. VT-26, no. 4, Nov. 1977, pp. 295-308.
- [CIR90] CCIR, XVIIth Plenary Assembly, Dusseldorf, 1990, vol. V, Rep. 567-3, Rec. 370-4, Rep. 239-4.
- [Cis03a] Cisco Reference Guide. “Cisco Aironet Antennas” Cisco System Inc.. 2003..
- [Cis03b] Cisco Data Sheet. “Cisco Aironet 1100 Series Access Point” Cisco System Inc. 2003.
- [CMR03] Actas Finales de la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR-03). Ginebra, 9 de junio-4 de julio de 2003
- [Col03] J. Coll. “OpenSIM” Ingeniería Arquitectura La Salle, Universitat Ramón Llull. 2002.
- [Con94] P. Constatinou, “Properties of Wireless RF Channels,” Wireless LAN Systems, Artech House, pp. 129-63, 1994.
- [Cos96] “Propagation Prediction Models,” COST 231 Final Rep., ch.4, pp. 17-21. 1996

- [Cra04] Nicola Cranley. "Model for Wireless Lan Transmitter Location for Optimal Performance". 2004. Documentación en formato electrónico.
- [CWK+97] B.P.Crow, I. Widjaja, J.G. Kim, P.T.Sakai, "IEEE 802.11 wireless local area networks", IEEE Communications Magazine, pp. 116-126, September 1997
- [Eri97] "EET-Ericsson Engineering Tool, User Reference Guide," Ericsson Radio Systems AB, 1997.
- [Eri99] "Wireless LAN User's Guide version 4.2" Ericsson Radio Systems AB, 1999
- [ETS96] "ETS 300328 Radio Equipment and Systems (RES); Wideband transmission systems; Technical characteristics and test conditions for data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using spread spectrum modulation techniques". European Telecommunications Standards Institute. Second edition. November-1996
- [ETSI] ETSI TR 101 112, *Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS v3.2.0*.
- [NNP00a] Aleksandar Neskovic, Natascha Neskovic y George Paunovic, "Modern approaches in modelling of mobile radio systems propagation environment", IEEE Communications Surveys. Third Quarter 2000.
- [NNP00b] A. Neskovic, N. Neskovic, and D. Paunovic, "Indoor Electric Field Level Prediction Model Based on the Artificial Neural Networks," IEEE COMML, vol. 4, no. 6, June 2000.
- [NNP98] A. Neskovic, N. Neskovic, and D. Paunovic, "A Field Strength Prediction Model Based on Artificial Neural Networks," Proc. 9<sup>th</sup> IEEE Med. Electro. Conf. – MELECON, Tel Aviv – Israel, May 1998.
- [Oku+68] Y. Okumura et al., "Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Services," Review Elec. Commun. Labs., vol. 16, Sept.–Oct., 1968, pp. 825–37.
- [PFT+88] Press, W.H.; Flannery, B.P.; Teukolskym, S.A.; Vetterling, W.T, Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, Cambridge, England, 1988.
- [PL95] K. Pahlavan and A. H. Levesque, Wireless Information Networks, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [PRB96] O. Perrault, J. P. Rossi, and T. Balandier, "Predicting Field Strength With a Neural Ray-Tracing Model," Proc. IEEE GLOBE-COM, London, Nov. 1996.
- [Rap96] Theodore S. Rappaport, Wireless Communications Principles and Practice, IEEE Press/Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 1996
- [RCR03] Juan Luir Redondo, Jaime Castellano, Vanesa Ruano, "Wi-Fi, Análisis, Diagnóstico y Políticas Públicas", GAPTEL; Red.es, 2003
- [RJB99] James Rumbaugh, Ivan Jacobson, Grady Booch. The Unified Modeling Language Reference Manual. Addison-Wesley. 1999.
- Versión en español: El Lenguaje Unificado de Modelado Manual de referencia. Addison-Wesley.2000.
- [Sau99] R.S. Saunders. *Antennas and Propagation for Wireless Communication System*. Ed.Wiley, 1999

- [Sbe96] Sbert, Mateu. The use of global random directions to compute radiosity. Global Monte Carlo Techniques. Memoria presentada a la Universidad Politécnica de Cataluña para la obtención del Doctorado en Informática. 1996.
- [Sie81] Siegel, R; Howell, J., Thermal Radiation Heat Transfer. Hemisphere, Washington D.C. 1981.
- [Ste01] John C. Stein. Indoor Radio WLAN Performance Part II: Range Performance in a Dense Office Environment, Harris Semiconductor, 2001
- [Ste98] John C. Stein. "Indoor Radio WLAN Performance". Intersil Corporation, 1998.
- [TT96] S. Y. Tan and H. S. Tan, "A Microcellular Communications Propagation Model Based on the Uniform Theory of Diffraction and Multiple Image Theory," IEEE Trans. Ant. And Prop., vol. 44, no. 10, Oct. 1996.
- [Wei+05] Eric W. Weisstein et al. "Gauss-Seidel Method." MathWorld—A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/Gauss-SeidelMethod.html>
- [Xia+93] H. H. Xia et al., "Radio Propagation Characteristics for Line-of-Sight Microcellular and Personal Communication," IEEE Trans. Ant. And Prop., vol. 41, no. 10, Oct. 1993.



# ANEXO A

## ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

---

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard
AFH	Adaptive Frequency Hopping
AP	Access Point
ASE	ASCII Scene Export
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSS	Basic Service Set
CCA	Clear Channel Assessment
CCK	Complimentary Code Keying
CEPT	Conférence Européenne des administrations des Postes et Télécommunications
CMT	Comisión del Mercado de la Telecomunicaciones
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	CSMA with Collision Avoidance
CSMA/CD	CSMA with Collision Detect
CTS	Clear To Send
DBPSK	Differential Binary Phase-Shift Keying
DECT	Digital European Cordless Telephone
DES	Data Encryption Standard
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DIFS	Distributed Inter Frame Space
DQPSK	Differential Quadrature Phase-Shift Keying
DS	Direct Sequence
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FER	Frame Error Rate
FH	Frequency Hopping
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSK	Frequency-Shift Keying
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Service

GSM	Global System for Mobile communications
HiperLAN	High PERFORMANCE radio Local Area Network
IAPP	Inter Access-Point Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronical Engineers
IFS	Inter Frame Space
IP	Internet Protocol
ISI	InterSymbol Interference
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Standard Organization
ISP	Internet Service Providers
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunications
LAN	Local Area Network
LOS	Line Of Sight
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MDT	Maximum Delay Time
NAV	Network Allocation Vector
NIC	Network Interface Card
NIST	National Institute of Standards and Technology
NLOS	No Line Of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Digital Multiplexing
OSI	Open System Interconnection
PAN	Personal Area Network
PDA	Personal Digital Assistant
PPP	Point to Point Protocol
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RMS	Root Mean Square
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTS	Request To Send
RUP	Rational Unified Process
SFD	Start Frame Delimiter
SYNC	Synchronization
TKIP	Temporal Key Integrity Protocol
UML	Unified Modelling Language
UMTS	Universal Mobile Telephony System
UTD	Uniform Theory of Diffraction
WAN	Wide Area Network
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
WEP	Wired Equivalence Privacy
WFA	Wireless Fidelity Alliance
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPA	WiFi Protected Access



# ANEXO B

## COMPARATIVA DE DATOS DE SEÑAL

---

En las siguientes hojas de cálculo están los resultados de calcular la señal teórica recibida en los modelos de propagación directa, propagación multi-wall, propagación linear-path, propagación dual-slope y propagación keenan-motley, utilizando una hoja de cálculo y utilizando el prototipo ZonaWiFi. No se ha programado el modelo de multitrayecto (radiosidad por refinamiento progresivo) por la complejidad que llevaría hacerlo en la hoja de cálculo; y tampoco propagación conjunta, puesto que utiliza la propagación multitrayecto.

### B.1 Prueba de propagación sin obstáculos

Las columnas con cabecera “Hoja” son los datos teóricos calculados en la hoja de cálculo. Las que tienen “ZonaWiFi” son los resultados del prototipo. Las que tienen “diferencia” son la diferencia entre ellas.

En la propagación directa, y por la forma de aplicar la atenuación al atravesar muros, se aplica una pérdida de la mitad de la atenuación del material al entrar en el muro, y de la otra mitad de la atenuación del material al salir. Como la atenuación en este caso era de 50 dB, pueden aparecer diferencias de múltiplos de 25.

En la propagación multi-wall, las diferencias pueden ser del valor total de la atenuación del muro.

Se han eliminado de la tabla los sensores con señales inferiores a -100 dBm para reducir su tamaño, puesto que no llegan al límite mínimo de cobertura. Y sólo se muestran unos pocos (unas pocas filas) de los 10201 sensores.

x	y	z	Hoja directa	Hoja multiwall	Hoja linear-path	Hoja dual-slope	Hoja keenan-motley	ZonaWifi Prop. Directa	ZonaWifi Prop. Multi-Wall	ZonaWifi Linear Path	ZonaWifi Dual Slope	ZonaWifi Keenan-Motley	diferencia Prop. Directa	diferencia Prop. Multi-Wall	diferencia Linear Path	diferencia Dual Slope	diferencia Keenan-Motley
0,36	1,35	-27,8	-62,46	-61,88	-74,95	-78,39	-62,46	-63,46	-61,88	-74,95	-78,39	-62,46	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-26,8	-62,13	-61,56	-74,16	-77,43	-62,13	-62,13	-61,56	-74,16	-77,44	-62,13	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
0,36	1,35	-25,8	-61,80	-61,23	-73,36	-76,44	-61,80	-62,8	-61,23	-73,36	-76,45	-61,8	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00
0,36	1,35	-24,8	-61,45	-60,89	-72,55	-75,41	-61,45	-63,45	-60,89	-72,55	-75,42	-61,45	2,00	0,00	0,00	0,01	0,00
0,36	1,35	-23,8	-61,08	-60,53	-71,72	-74,34	-61,08	-63,08	-60,53	-71,72	-74,34	-61,08	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-22,8	-60,70	-60,16	-70,88	-73,23	-60,70	-61,7	-60,16	-70,88	-73,23	-60,7	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-21,8	-60,31	-59,77	-70,02	-72,06	-60,31	-60,31	-59,77	-70,02	-72,06	-60,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-20,8	-59,89	-59,36	-69,14	-70,83	-59,89	-60,89	-59,36	-69,14	-70,84	-59,89	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00
0,36	1,35	-19,8	-59,45	-58,94	-68,24	-69,55	-59,45	-60,45	-58,94	-68,24	-69,55	-59,45	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-18,8	-59,00	-58,49	-67,32	-68,20	-59,00	-59	-58,49	-67,32	-68,2	-59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-17,8	-58,51	-58,01	-66,38	-66,78	-58,51	-58,51	-58,01	-66,38	-66,78	-58,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-16,8	-58,00	-57,51	-65,41	-65,28	-58,00	-58	-57,51	-65,41	-65,28	-58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-15,8	-57,46	-56,98	-64,41	-63,68	-57,46	-58,46	-56,98	-64,41	-63,68	-57,46	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-14,8	-56,88	-56,41	-63,37	-61,98	-56,88	-57,88	-56,41	-63,37	-61,98	-56,88	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-13,8	-56,26	-55,80	-62,29	-60,16	-56,26	-56,26	-55,8	-62,3	-60,16	-56,26	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
0,36	1,35	-12,8	-55,60	-55,15	-61,17	-58,20	-55,60	-55,6	-55,15	-61,17	-58,2	-55,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-11,8	-54,88	-54,45	-60,00	-56,09	-54,88	-55,88	-54,45	-60	-56,09	-54,88	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-10,8	-54,09	-53,68	-58,76	-53,79	-54,09	-55,1	-53,68	-58,77	-53,79	-54,1	1,01	0,00	0,01	0,00	0,01
0,36	1,35	-9,79	-53,24	-52,84	-57,46	-51,27	-53,24	-54,24	-52,84	-57,46	-51,27	-53,24	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-8,79	-52,29	-51,91	-56,06	-48,48	-52,29	-54,29	-51,91	-56,06	-48,48	-52,29	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-7,79	-51,23	-50,87	-54,55	-45,36	-51,23	-51,23	-50,87	-54,55	-45,36	-51,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-6,79	-50,02	-49,69	-52,90	-41,81	-50,02	-51,02	-49,69	-52,9	-41,82	-50,02	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00
0,36	1,35	-5,79	-48,63	-48,32	-51,07	-37,72	-48,63	-48,63	-48,33	-51,07	-37,72	-48,63	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-4,79	-46,98	-46,71	-48,99	-33,42	-46,98	-46,99	-46,71	-48,99	-33,42	-46,99	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
0,36	1,35	-3,79	-44,97	-44,74	-46,55	-31,44	-44,97	-45,97	-44,74	-46,55	-31,44	-44,97	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	-2,79	-42,39	-42,21	-43,57	-28,92	-42,39	-44,4	-42,21	-43,57	-28,92	-42,4	2,01	0,00	0,00	0,00	0,01
0,36	1,35	-1,79	-38,86	-38,75	-39,66	-25,45	-38,86	-40,87	-38,75	-39,66	-25,46	-38,87	2,01	0,00	0,00	0,01	0,01
0,36	1,35	-0,79	-33,72	-33,70	-34,21	-20,41	-33,72	-34,73	-33,71	-34,22	-20,42	-33,73	1,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0,36	1,35	0,21	-30,71	-30,75	-31,12	-17,46	-30,71	-31,71	-30,76	-31,12	-17,46	-30,71	1,00	0,01	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	1,21	-36,11	-36,05	-36,71	-22,75	-36,11	-36,1	-36,04	-36,71	-22,75	-36,1	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,01
0,36	1,35	2,21	-40,50	-40,35	-41,45	-27,06	-40,50	-40,5	-40,35	-41,45	-27,06	-40,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	3,21	-43,56	-43,36	-44,91	-30,06	-43,56	-45,56	-43,35	-44,9	-30,06	-43,56	2,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00
0,36	1,35	4,21	-45,87	-45,62	-47,63	-32,32	-45,87	-46,87	-45,62	-47,63	-32,32	-45,87	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	5,21	-47,71	-47,42	-49,90	-35,02	-47,71	-47,71	-47,42	-49,9	-35,02	-47,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	6,21	-49,24	-48,92	-51,86	-39,52	-49,24	-51,24	-48,92	-51,86	-39,51	-49,24	2,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
0,36	1,35	7,21	-50,55	-50,20	-53,61	-43,36	-50,55	-51,55	-50,2	-53,61	-43,36	-50,55	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	8,21	-51,69	-51,32	-55,20	-46,71	-51,69	-51,69	-51,32	-55,2	-46,71	-51,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	9,21	-52,70	-52,31	-56,66	-49,69	-52,70	-53,7	-52,31	-56,66	-49,68	-52,7	1,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
0,36	1,35	10,21	-53,61	-53,20	-58,01	-52,36	-53,61	-54,61	-53,2	-58,01	-52,35	-53,61	1,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
0,36	1,35	11,21	-54,43	-54,01	-59,29	-54,78	-54,43	-55,43	-54,01	-59,29	-54,78	-54,43	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	12,21	-55,19	-54,75	-60,50	-57,00	-55,19	-56,18	-54,75	-60,5	-57	-55,18	0,99	0,00	0,00	0,00	-0,01
0,36	1,35	13,21	-55,88	-55,43	-61,65	-59,04	-55,88	-56,88	-55,43	-61,65	-59,04	-55,88	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	14,21	-56,53	-56,06	-62,75	-60,94	-56,53	-57,52	-56,06	-62,75	-60,94	-56,52	0,99	0,00	0,00	0,00	-0,01
0,36	1,35	15,21	-57,13	-56,65	-63,81	-62,71	-57,13	-57,13	-56,65	-63,81	-62,7	-57,13	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
0,36	1,35	16,21	-57,69	-57,20	-64,83	-64,36	-57,69	-57,69	-57,2	-64,83	-64,36	-57,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	17,21	-58,22	-57,72	-65,82	-65,92	-58,22	-59,22	-57,72	-65,82	-65,92	-58,22	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	18,21	-58,72	-58,21	-66,78	-67,39	-58,72	-60,72	-58,21	-66,78	-67,39	-58,72	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	19,21	-59,19	-58,68	-67,71	-68,78	-59,19	-61,19	-58,68	-67,71	-68,78	-59,19	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	20,21	-59,64	-59,12	-68,62	-70,10	-59,64	-59,64	-59,12	-68,62	-70,1	-59,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	21,21	-60,07	-59,54	-69,51	-71,35	-60,07	-60,07	-59,54	-69,51	-71,35	-60,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	22,21	-60,47	-59,94	-70,38	-72,55	-60,47	-62,47	-59,94	-70,38	-72,55	-60,47	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	23,21	-60,86	-60,32	-71,23	-73,70	-60,86	-60,86	-60,32	-71,23	-73,7	-60,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	24,21	-61,24	-60,68	-72,07	-74,80	-61,24	-61,24	-60,68	-72,07	-74,8	-61,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	25,21	-61,60	-61,04	-72,89	-75,85	-61,60	-62,6	-61,03	-72,89	-75,85	-61,6	1,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	26,21	-61,94	-61,37	-73,70	-76,87	-61,94	-61,94	-61,37	-73,7	-76,86	-61,94	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
0,36	1,35	27,21	-62,27	-61,70	-74,49	-77,84	-62,27	-63,27	-61,7	-74,49	-77,84	-62,27	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	28,21	-62,59	-62,01	-75,27	-78,78	-62,59	-63,59	-62,01	-75,27	-78,78	-62,59	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	29,21	-62,90	-62,31	-76,05	-79,69	-62,90	-64,9	-62,31	-76,05	-79,69	-62,9	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	30,21	-63,20	-62,61	-76,81	-80,56	-63,20	-63,2	-62,61	-76,81	-80,56	-63,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	31,21	-63,49	-62,89	-77,56	-81,41	-63,49	-64,49	-62,89	-77,56	-81,41	-63,49	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	32,21	-63,77	-63,16	-78,30	-82,23	-63,77	-64,77	-63,16	-78,3	-82,23	-63,77	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	33,21	-64,04	-63,43	-79,04	-83,03	-64,04	-64,04	-63,43	-79,04	-83,03	-64,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	34,21	-64,30	-63,69	-79,77	-83,80	-64,30	-64,3	-63,68	-79,77	-83,8	-64,3	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	35,21	-64,55	-63,94	-80,49	-84,55	-64,55	-64,55	-63,94	-80,49	-84,55	-64,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	36,21	-64,80	-64,18	-81,20	-85,28	-64,80	-65,8	-64,18	-81,2	-85,28	-64,8	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	37,21	-65,04	-64,41	-81,91	-85,99	-65,04	-65,04	-64,41	-81,91	-85,99	-65,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	38,21	-65,28	-64,65	-82,61	-86,68	-65,28	-66,28	-64,65	-82,61	-86,68	-65,28	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 34 Propagación sin obstáculos (resultados teóricos - 1)

			Hoja	Hoja	Hoja	Hoja	Hoja	ZonaWifi	ZonaWifi	ZonaWifi	ZonaWifi	ZonaWifi	diferencia	diferencia	diferencia	diferencia	diferencia
x	y	z	directa	multiwail	linear-path	dual-slope	keenan-motley	Prop. Directa	Prop. Multi-Wail	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley	Prop. Directa	Prop. Multi-Wail	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley
0,36	1,35	39,21	-65,51	-64,87	-83,30	-87,36	-65,51	-67,51	-64,87	-83,3	-87,35	-65,51	2,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
0,36	1,35	40,21	-65,73	-65,09	-83,99	-88,01	-65,73	-66,73	-65,09	-83,99	-88,01	-65,73	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	41,21	-65,95	-65,30	-84,67	-88,65	-65,95	-65,95	-65,3	-84,67	-88,65	-65,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	42,21	-66,16	-65,51	-85,35	-89,28	-66,16	-68,16	-65,51	-85,35	-89,28	-66,16	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	43,21	-66,37	-65,71	-86,02	-89,89	-66,37	-66,37	-65,71	-86,02	-89,88	-66,37	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
0,36	1,35	44,21	-66,57	-65,91	-86,69	-90,48	-66,57	-68,57	-65,91	-86,69	-90,48	-66,57	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	45,21	-66,77	-66,11	-87,36	-91,06	-66,77	-68,77	-66,11	-87,36	-91,06	-66,77	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	46,21	-66,96	-66,30	-88,02	-91,63	-66,96	-66,96	-66,3	-88,02	-91,63	-66,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	47,21	-67,15	-66,48	-88,67	-92,19	-67,15	-67,15	-66,48	-88,67	-92,19	-67,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	48,21	-67,34	-66,66	-89,33	-92,74	-67,34	-67,34	-66,66	-89,32	-92,74	-67,34	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00
0,36	1,35	49,21	-67,52	-66,84	-89,97	-93,27	-67,52	-68,52	-66,84	-89,97	-93,27	-67,52	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	1,35	50,21	-67,70	-67,02	-90,62	-93,80	-67,70	-69,7	-67,02	-90,62	-93,8	-67,7	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-49,8	-67,63	-66,95	-90,36	-93,59	-67,63	-117,6	-150	-90,36	-93,59	-67,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-48,8	-67,45	-66,77	-89,71	-93,06	-67,45	-68,45	-66,77	-89,71	-93,06	-67,45	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-47,8	-67,26	-66,59	-89,06	-92,52	-67,26	-68,26	-66,59	-89,06	-92,52	-67,26	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-46,8	-67,08	-66,41	-88,41	-91,97	-67,08	-67,08	-66,41	-88,41	-91,97	-67,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-45,8	-66,88	-66,22	-87,75	-91,41	-66,88	-68,88	-66,22	-87,75	-91,41	-66,88	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-44,8	-66,69	-66,03	-87,09	-90,83	-66,69	-66,69	-66,03	-87,09	-90,83	-66,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-43,8	-66,49	-65,83	-86,43	-90,24	-66,49	-66,49	-65,83	-86,43	-90,24	-66,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-42,8	-66,28	-65,63	-85,76	-89,64	-66,28	-67,29	-65,63	-85,76	-89,64	-66,28	1,01	0,00	0,00	0,00	0,01
1,36	1,35	-41,8	-66,08	-65,43	-85,08	-89,03	-66,08	-66,08	-65,43	-85,08	-89,03	-66,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-40,8	-65,86	-65,22	-84,40	-88,40	-65,86	-66,86	-65,22	-84,4	-88,4	-65,86	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-39,8	-65,64	-65,00	-83,72	-87,75	-65,64	-66,64	-65	-83,72	-87,75	-65,64	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-38,8	-65,42	-64,78	-83,03	-87,09	-65,42	-67,42	-64,78	-83,03	-87,09	-65,42	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-37,8	-65,19	-64,55	-82,33	-86,41	-65,19	-65,19	-64,55	-82,33	-86,41	-65,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-36,8	-64,95	-64,32	-81,63	-85,71	-64,95	-65,95	-64,32	-81,63	-85,71	-64,95	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-35,8	-64,70	-64,08	-80,92	-85,00	-64,70	-65,7	-64,08	-80,92	-85	-64,7	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-34,8	-64,45	-63,84	-80,20	-84,26	-64,45	-64,45	-63,84	-80,2	-84,26	-64,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-33,8	-64,20	-63,58	-79,48	-83,50	-64,20	-65,2	-63,58	-79,48	-83,5	-64,2	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-32,8	-63,93	-63,32	-78,75	-82,72	-63,93	-63,93	-63,32	-78,75	-82,72	-63,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-31,8	-63,66	-63,06	-78,01	-81,91	-63,66	-64,66	-63,06	-78,01	-81,91	-63,66	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-30,8	-63,37	-62,78	-77,27	-81,08	-63,37	-65,37	-62,78	-77,27	-81,08	-63,37	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-29,8	-63,08	-62,49	-76,51	-80,22	-63,08	-65,08	-62,49	-76,51	-80,22	-63,08	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-28,8	-62,78	-62,20	-75,75	-79,34	-62,78	-64,78	-62,2	-75,75	-79,34	-62,78	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-27,8	-62,47	-61,89	-74,97	-78,42	-62,47	-62,47	-61,89	-74,97	-78,42	-62,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-26,8	-62,14	-61,57	-74,18	-77,47	-62,14	-62,14	-61,57	-74,19	-77,47	-62,14	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
1,36	1,35	-25,8	-61,81	-61,24	-73,39	-76,48	-61,81	-63,81	-61,24	-73,39	-76,48	-61,81	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-24,8	-61,46	-60,90	-72,57	-75,45	-61,46	-61,46	-60,9	-72,58	-75,45	-61,46	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
1,36	1,35	-23,8	-61,10	-60,55	-71,75	-74,38	-61,10	-62,1	-60,55	-71,75	-74,38	-61,1	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-22,8	-60,72	-60,17	-70,91	-73,27	-60,72	-61,72	-60,17	-70,91	-73,27	-60,72	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-21,8	-60,32	-59,79	-70,05	-72,10	-60,32	-61,32	-59,79	-70,05	-72,11	-60,32	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1,36	1,35	-20,8	-59,91	-59,38	-69,18	-70,89	-59,91	-59,91	-59,38	-69,18	-70,89	-59,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-19,8	-59,47	-58,95	-68,28	-69,61	-59,47	-59,47	-58,95	-68,28	-69,61	-59,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-18,8	-59,02	-58,51	-67,37	-68,27	-59,02	-60,02	-58,51	-67,37	-68,27	-59,02	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-17,8	-58,54	-58,03	-66,43	-66,85	-58,54	-60,54	-58,04	-66,43	-66,85	-58,54	2,00	0,01	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-16,8	-58,03	-57,54	-65,46	-65,35	-58,03	-59,03	-57,54	-65,46	-65,36	-58,03	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1,36	1,35	-15,8	-57,49	-57,01	-64,46	-63,77	-57,49	-57,49	-57,01	-64,46	-63,77	-57,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-14,8	-56,91	-56,44	-63,43	-62,08	-56,91	-56,91	-56,44	-63,43	-62,08	-56,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-13,8	-56,30	-55,84	-62,36	-60,28	-56,30	-58,3	-55,84	-62,36	-60,28	-56,3	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-12,8	-55,64	-55,20	-61,25	-58,34	-55,64	-55,64	-55,2	-61,25	-58,34	-55,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-11,8	-54,93	-54,50	-60,09	-56,25	-54,93	-55,93	-54,5	-60,09	-56,25	-54,93	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-10,8	-54,16	-53,74	-58,86	-53,98	-54,16	-56,16	-53,75	-58,87	-53,98	-54,16	2,00	0,01	0,01	0,00	0,00
1,36	1,35	-9,79	-53,32	-52,92	-57,57	-51,50	-53,32	-53,32	-52,92	-57,57	-51,5	-53,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-8,79	-52,39	-52,01	-56,20	-48,76	-52,39	-53,39	-52,01	-56,2	-48,77	-52,39	1,00	0,00	0,00	0,00	0,01
1,36	1,35	-7,79	-51,35	-50,99	-54,72	-45,72	-51,35	-52,35	-50,99	-54,72	-45,72	-51,35	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-6,79	-50,18	-49,85	-53,12	-42,29	-50,18	-51,18	-49,85	-53,12	-42,29	-50,18	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-5,79	-48,85	-48,54	-51,35	-38,36	-48,85	-48,85	-48,54	-51,35	-38,37	-48,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
1,36	1,35	-4,79	-47,30	-47,02	-49,38	-33,80	-47,30	-49,3	-47,02	-49,38	-33,8	-47,3	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-3,79	-45,45	-45,21	-47,13	-31,92	-45,45	-45,46	-45,21	-47,13	-31,92	-45,46	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	-2,79	-43,22	-43,02	-44,51	-29,73	-43,22	-44,23	-43,03	-44,52	-29,73	-43,23	1,01	0,01	0,01	0,00	0,00
1,36	1,35	-1,79	-40,53	-40,38	-41,48	-27,09	-40,53	-41,54	-40,39	-41,49	-27,09	-40,54	1,01	0,01	0,01	0,00	0,00
1,36	1,35	-0,79	-37,71	-37,62	-38,42	-24,32	-37,71	-37,72	-37,62	-38,42	-24,33	-37,72	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	0,21	-36,72	-36,65	-37,36	-23,35	-36,72	-36,72	-36,65	-37,37	-23,36	-36,72	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
1,36	1,35	1,21	-38,84	-38,72	-39,63	-25,43	-38,84	-38,84	-38,72	-39,63	-25,43	-38,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	2,21	-41,72	-41,55	-42,80	-28,25	-41,72	-41,72	-41,55	-42,8	-28,25	-41,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,36	1,35	3,21	-44,22	-44,00	-45,66	-30,70	-44,22	-45,21	-43,99	-45,66	-30,7	-44,21	0,99	-0,01	0,00	0,00	-0,01
1,36	1,35	4,21	-46,27	-46,01	-48,11	-32,71	-46,27	-48,27	-46,01	-48,11	-32,71	-46,27	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 35 Propagación sin obstáculos (resultados teóricos - 2)

## B.2 Prueba de propagación (claustro)

Las columnas con cabecera “Hoja” son los datos teóricos calculados en una hoja de cálculo. Las que tienen “ZonaWiFi” son los resultados del prototipo. Las que tienen “diferencia” son la diferencia entre ellas.

Las columnas con cabecera “Corregida” son correcciones a las diferencias de apreciación sobre si un sensor está a un lado, a otro o dentro de un muro, en los cálculos teóricos de la hoja de cálculo y en el prototipo.

En la propagación directa, y por la forma de aplicar la atenuación al atravesar muros, se aplica una pérdida de la mitad de la atenuación del material al entrar en el muro, y de la otra mitad de la atenuación del material al salir. Como la atenuación en este caso era de 50 dB, pueden aparecer diferencias de multiples de 25.

En la propagación multi-wall, las diferencias pueden ser del valor total de la atenuación del muro.

Se han eliminado de la tabla los sensores con señales inferiores a -100 dBm para reducir su tamaño, puesto que no llegan al límite mínimo de cobertura.

x	y	z	directa	multiwall	linear-path	dual-slope	keenan-motley	Prop. Directa	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley	Prop. Directa	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley	Prop. Directa	Prop. Multiwall
-9,66	1,25	-8,86	-43,99	-43,58	-48,60	-53,48	-43,99	-69,99	-93,58	-48,6	-53,48	-43,99	26,00	50,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
-9,66	1,25	-7,86	-44,04	-43,63	-48,68	-53,62	-44,04	-69,04	-93,63	-48,68	-53,62	-44,04	25,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-9,66	1,25	-6,86	-44,16	-43,75	-48,87	-53,99	-44,16	-69,16	-93,75	-48,87	-53,99	-44,16	25,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-9,66	1,25	-5,86	-44,35	-43,94	-49,17	-54,56	-44,35	-70,35	-93,94	-49,17	-54,55	-44,35	26,00	50,00	0,00	-0,01	0,00	1,00	0,00
-9,66	1,25	-4,86	-44,61	-44,18	-49,57	-55,30	-44,61	-70,61	-94,18	-49,57	-55,29	-44,61	26,00	50,00	0,00	-0,01	0,00	1,00	0,00
-9,66	1,25	-3,86	-44,91	-44,48	-50,05	-56,19	-44,91	-71,91	-94,48	-50,05	-56,18	-44,91	27,00	50,00	0,00	-0,01	0,00	2,00	0,00
-8,66	1,25	-9,86	-43,15	-42,76	-47,33	-51,03	-43,15	-94,16	-142,8	-47,33	-51,03	-43,16	51,01	0,00	0,00	0,00	0,01	1,01	0,00
-8,66	1,25	-8,86	-43,12	-42,73	-47,28	-50,93	-43,12	-44,12	-42,73	-47,28	-50,93	-43,12	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
-8,66	1,25	-7,86	-43,18	-42,79	-47,37	-51,10	-43,18	-43,18	-42,78	-47,37	-51,1	-43,18	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
-8,66	1,25	-6,86	-43,33	-42,93	-47,60	-51,54	-43,33	-44,33	-42,93	-47,59	-51,54	-43,33	1,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	1,00	0,00
-8,66	1,25	-5,86	-43,56	-43,16	-47,95	-52,22	-43,56	-44,56	-43,16	-47,94	-52,22	-43,56	1,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	1,00	0,00
-8,66	1,25	-4,86	-43,86	-43,45	-48,41	-53,11	-43,86	-44,86	-43,45	-48,4	-53,1	-43,86	1,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	1,00	0,00
-7,66	1,25	-9,86	-42,20	-41,83	-45,93	-48,22	-42,20	-92,2	-141,8	-45,93	-48,22	-42,2	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-7,66	1,25	-8,86	-42,16	-41,78	-45,87	-48,10	-42,16	-42,16	-41,78	-45,87	-48,1	-42,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-7,66	1,25	-7,86	-42,23	-41,86	-45,98	-48,32	-42,23	-44,23	-41,86	-45,98	-48,32	-42,23	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00
-7,66	1,25	-6,86	-42,42	-42,04	-46,25	-48,86	-42,42	-42,42	-42,04	-46,24	-48,86	-42,42	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
-7,66	1,25	-5,86	-42,70	-42,32	-46,66	-49,69	-42,70	-42,7	-42,31	-46,66	-49,69	-42,7	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
-7,66	1,25	-4,86	-43,06	-42,67	-47,20	-50,76	-43,06	-43,06	-42,67	-47,19	-50,75	-43,06	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
-6,66	1,25	-9,86	-41,14	-40,78	-44,42	-45,09	-41,14	-92,14	-140,8	-44,42	-45,09	-41,14	51,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
-6,66	1,25	-8,86	-41,08	-40,73	-44,35	-44,93	-41,08	-41,08	-40,73	-44,35	-44,93	-41,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-6,66	1,25	-7,86	-41,18	-40,82	-44,48	-45,21	-41,18	-43,18	-40,82	-44,48	-45,21	-41,18	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00
-6,66	1,25	-6,86	-41,41	-41,05	-44,80	-45,89	-41,41	-43,41	-41,05	-44,8	-45,89	-41,41	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00
-6,66	1,25	-5,86	-41,76	-41,39	-45,30	-46,93	-41,76	-42,76	-41,39	-45,3	-46,93	-41,76	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
-5,66	1,25	-9,86	-39,93	-39,60	-42,77	-41,53	-39,93	-90,93	-139,6	-42,77	-41,53	-39,93	51,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
-5,66	1,25	-8,86	-39,86	-39,53	-42,68	-41,32	-39,86	-41,86	-39,53	-42,68	-41,32	-39,86	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00
-5,66	1,25	-7,86	-39,98	-39,65	-42,84	-41,69	-39,98	-40,98	-39,65	-42,84	-41,69	-39,98	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
-5,66	1,25	-6,86	-40,28	-39,95	-43,25	-42,58	-40,28	-40,28	-39,94	-43,25	-42,58	-40,28	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
-5,66	1,25	-5,86	-40,73	-40,39	-43,86	-43,90	-40,73	-41,73	-40,38	-43,86	-43,9	-40,73	1,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	1,00	-0,01
-4,66	1,25	-9,86	-38,53	-38,23	-40,94	-37,43	-38,53	-89,53	-138,2	-40,94	-37,44	-38,53	51,00	0,00	0,00	0,01	0,00	1,00	0,00
-4,66	1,25	-8,86	-38,44	-38,13	-40,82	-37,15	-38,44	-39,44	-38,13	-40,82	-37,15	-38,44	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
-4,66	1,25	-7,86	-38,61	-38,30	-41,04	-37,65	-38,61	-38,61	-38,3	-41,04	-37,65	-38,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-4,66	1,25	-6,86	-39,02	-38,70	-41,57	-38,86	-39,02	-41,01	-38,7	-41,57	-38,85	-39,01	1,99	0,00	0,00	-0,01	-0,01	1,99	0,00
-4,66	1,25	-5,86	-39,61	-39,28	-42,34	-40,59	-39,61	-39,6	-39,28	-42,34	-40,58	-39,6	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
-4,66	1,25	-4,86	-90,31	-89,97	-43,28	-42,65	-40,31	-90,3	-140	-43,28	-42,64	-40,3	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
-4,66	1,25	-3,86	-91,06	-90,71	-44,32	-44,88	-41,06	-93,06	-140,7	-44,32	-44,87	-41,06	2,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	2,00	0,00
-4,66	1,25	-2,86	-91,84	-91,47	-45,41	-47,15	-41,84	-93,84	-141,5	-45,41	-47,15	-41,84	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00
-4,66	1,25	-1,86	-92,61	-92,22	-46,52	-49,41	-42,61	-92,6	-142,2	-46,51	-49,4	-42,6	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
-4,66	1,25	-0,86	-93,35	-92,95	-47,62	-51,60	-43,35	-93,35	-143	-47,62	-51,59	-43,35	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
-4,66	1,25	0,14	-94,06	-93,65	-48,71	-53,70	-44,06	-95,06	-143,7	-48,71	-53,69	-44,06	1,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	1,00	0,00
-4,66	1,25	1,14	-94,74	-94,32	-49,79	-55,70	-44,74	-94,74	-144,3	-49,78	-55,69	-44,74	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
-4,66	1,25	2,14	-95,39	-94,95	-50,83	-57,60	-45,39	-97,39	-145	-50,83	-57,59	-45,39	2,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	2,00	0,00
-4,66	1,25	3,14	-96,00	-95,55	-51,86	-59,40	-46,00	-96	-145,6	-51,85	-59,4	-46	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
-4,66	1,25	4,14	-96,59	-96,12	-52,86	-61,12	-46,59	-97,58	-146,1	-52,85	-61,11	-46,58	0,99	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,99	0,00
-4,66	1,25	5,14	-97,14	-96,66	-53,83	-62,74	-47,14	-98,14	-146,7	-53,83	-62,73	-47,14	1,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	1,00	0,00

Tabla 36 Prueba de Propagación Claustro (resultados teóricos)

x	y	z	Hoja directa	Hoja multiwall	Hoja linear-path	Hoja dual-slope	Hoja Keenan-Motley	Prop. Directa	Zona/Wifi	Prop. Multi-Wall	Zona/Wifi	Linear Path	Zona/Wifi	Dual Slope	Zona/Wifi	Keenan-Motley	Zona/Wifi	Prop. Directa	Prop. Multi-Wall	diferencia	diferencia	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley	Prop. Directa	Prop. Multiwall
-3.66	1.25	-9.86	-36.89	-36.62	-38.88	-33.33	-36.89	-86.89	-136.6	-38.88	-33.33	-36.89	-36.89	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	-8.86	-36.75	-36.48	-38.70	-33.19	-36.75	-86.75	-136.48	-38.7	-33.19	-36.75	-36.75	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	-7.86	-37.00	-36.73	-39.01	-33.43	-37.00	-86.73	-136.73	-39	-33.43	-37	-37	2.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	-0.01	-0.01	-0.01
-3.66	1.25	-6.86	-37.58	-37.29	-39.73	-34.62	-37.58	-87.58	-137.29	-39.72	-34.61	-37.57	-37.57	0.99	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	-5.86	-38.37	-38.07	-40.73	-36.96	-38.37	-89.37	-139.07	-40.73	-36.95	-38.37	-38.37	1.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	-4.86	-89.28	-88.96	-41.91	-39.62	-39.28	-89.27	-139	-41.9	-39.61	-39.27	-39.27	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
-3.66	1.25	-3.86	-90.21	-89.88	-43.15	-42.37	-40.21	-90.21	-139.9	-43.15	-42.36	-40.21	-40.21	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	-2.86	-91.14	-90.78	-44.42	-45.09	-41.14	-92.13	-140.8	-44.41	-45.08	-41.13	-41.13	0.99	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	-1.86	-92.02	-91.65	-45.67	-47.69	-42.02	-94.02	-141.6	-45.67	-47.68	-42.02	-42.02	2.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	-0.86	-92.86	-92.47	-46.89	-50.16	-42.86	-93.86	-142.5	-46.89	-50.15	-42.86	-42.86	1.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	0.14	-93.65	-93.25	-48.08	-52.48	-43.65	-93.65	-143.2	-48.08	-52.47	-43.65	-43.65	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	1.14	-94.39	-93.97	-49.23	-54.66	-44.39	-94.39	-144	-49.22	-54.66	-44.39	-44.39	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	2.14	-95.09	-94.65	-50.34	-56.71	-45.09	-95.09	-144.7	-50.34	-56.7	-45.09	-45.09	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	3.14	-95.74	-95.30	-51.42	-58.63	-45.74	-96.74	-145.3	-51.41	-58.63	-45.74	-45.74	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-3.66	1.25	4.14	-96.36	-95.90	-52.46	-60.44	-46.36	-96.35	-145.9	-52.46	-60.44	-46.35	-46.35	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
-3.66	1.25	5.14	-96.94	-96.47	-53.47	-62.15	-46.94	-98.93	-146.5	-53.47	-62.14	-46.93	-46.93	1.99	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	-9.86	-34.91	-34.67	-36.47	-31.38	-34.91	-85.91	-134.7	-36.48	-31.38	-34.91	-34.91	51.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	-8.86	-34.68	-34.45	-36.21	-31.16	-34.68	-85.68	-134.5	-36.21	-31.16	-34.68	-34.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	-7.86	-35.07	-34.83	-36.67	-31.54	-35.07	-86.07	-134.83	-36.67	-31.54	-35.07	-35.07	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	-6.86	-35.93	-35.68	-37.70	-32.39	-35.93	-87.93	-135.68	-37.7	-32.38	-35.93	-35.93	2.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	-5.86	-37.04	-36.77	-39.06	-33.47	-37.04	-88.04	-136.76	-39.06	-33.47	-37.04	-37.04	1.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
-2.66	1.25	-4.86	-88.23	-87.93	-40.55	-36.53	-38.23	-90.22	-137.9	-40.54	-36.51	-38.22	-38.22	1.99	0.00	-0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	-3.86	-89.38	-89.06	-42.05	-39.93	-39.38	-90.38	-139.1	-42.04	-39.92	-39.38	-39.38	1.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	-2.86	-90.47	-90.13	-43.51	-43.14	-40.47	-91.47	-140.1	-43.5	-43.13	-40.47	-40.47	1.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	-1.86	-91.49	-91.12	-44.91	-46.12	-41.49	-93.48	-141.1	-44.91	-46.11	-41.48	-41.48	1.99	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	-0.86	-92.42	-92.04	-46.25	-48.87	-42.42	-92.42	-142	-46.25	-48.86	-42.42	-42.42	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	0.14	-93.29	-92.89	-47.53	-51.42	-43.29	-94.28	-142.9	-47.53	-51.41	-43.28	-43.28	0.99	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	1.14	-94.09	-93.67	-48.75	-53.77	-44.09	-94.08	-143.7	-48.75	-53.76	-44.08	-44.08	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
-2.66	1.25	2.14	-94.83	-94.40	-49.92	-55.95	-44.83	-95.83	-144.4	-49.92	-55.94	-44.83	-44.83	1.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	3.14	-95.52	-95.08	-51.05	-57.98	-45.52	-97.52	-145.1	-51.04	-57.97	-45.52	-45.52	2.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	4.14	-96.16	-95.71	-52.13	-59.88	-46.16	-97.16	-145.7	-52.13	-59.87	-46.16	-46.16	1.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.66	1.25	5.14	-96.77	-96.30	-53.18	-61.65	-46.77	-98.77	-146.3	-53.17	-61.65	-46.77	-46.77	2.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	-9.86	-32.42	-32.23	-33.59	-28.94	-32.42	-83.42	-132.2	-33.6	-28.94	-32.42	-32.42	51.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	-8.86	-32.02	-31.84	-33.14	-28.55	-32.02	-83.02	-131.84	-33.14	-28.55	-32.02	-32.02	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	-7.86	-32.70	-32.51	-33.92	-29.22	-32.70	-82.7	-132.51	-33.91	-29.21	-32.7	-32.7	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	-6.86	-34.09	-33.87	-35.51	-30.58	-34.09	-84.08	-133.86	-35.51	-30.57	-34.08	-34.08	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
-1.66	1.25	-5.86	-35.68	-35.43	-37.40	-32.14	-35.68	-87.67	-135.42	-37.39	-32.13	-35.67	-35.67	1.99	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.99	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
-1.66	1.25	-4.86	-87.22	-86.94	-39.28	-33.65	-37.22	-89.21	-136.9	-39.27	-33.64	-37.21	-37.21	1.99	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	-3.86	-88.63	-88.32	-41.07	-37.71	-38.63	-88.62	-138.3	-41.06	-37.7	-38.62	-38.62	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
-1.66	1.25	-2.86	-89.90	-89.56	-42.73	-41.44	-39.90	-89.89	-139.6	-42.72	-41.43	-39.89	-39.89	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
-1.66	1.25	-1.86	-91.03	-90.68	-44.28	-44.79	-41.90	-92.03	-140.7	-44.27	-44.77	-41.03	-41.03	1.00	0.00	-0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	-0.86	-92.06	-91.69	-45.73	-47.81	-42.06	-92.06	-141.7	-45.72	-47.79	-42.06	-42.06	0.00	0.00	-0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	0.14	-92.99	-92.60	-47.09	-50.54	-42.99	-92.99	-142.6	-47.08	-50.53	-42.99	-42.99	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	1.14	-93.84	-93.43	-48.37	-53.04	-43.84	-93.84	-143.4	-48.37	-53.03	-43.84	-43.84	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	2.14	-94.62	-94.20	-49.59	-55.34	-44.62	-94.62	-144.2	-49.59	-55.33	-44.62	-44.62	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	3.14	-95.34	-94.90	-50.76	-57.46	-45.34	-97.34	-144.9	-50.75	-57.45	-45.34	-45.34	2.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-1.66	1.25	4.14	-96.01	-95.56	-51.87	-59.43	-46.01	-96.01	-145.6	-51.87	-59.42	-4														

Comparativa de Datos de señal

x	y	z	Hoja directa	Hoja multiwall	Hoja linear-path	Hoja dual-slope	Hoja keenan-moiley	ZonaWifi Prop. Directa	ZonaWifi Prop. Multi-Wall	ZonaWifi Linear Path	ZonaWifi Dual Slope	ZonaWifi Keenan-Moiley	diferencia Prop. Directa	diferencia Prop. Multi-Wall	diferencia Linear Path	diferencia Dual Slope	diferencia Keenan-Moiley	correctada Prop Directa	correctada Prop Multiwall
2,34	1,25	-9,86	-28,01	-27,91	-28,74	-24,62	-28,01	-78,02	-127,9	-28,75	-24,63	-28,02	50,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
2,34	1,25	-8,86	-26,84	-26,76	-27,49	-23,47	-26,84	-26,83	-26,76	-27,48	-23,46	-26,83	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
2,34	1,25	-7,86	-28,74	-28,63	-29,53	-25,34	-28,74	-28,73	-28,62	-29,52	-25,33	-28,73	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
2,34	1,25	-6,86	-31,58	-31,41	-32,65	-28,12	-31,58	-32,57	-31,4	-32,64	-28,11	-31,57	0,99	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,99	-0,01
2,34	1,25	-5,86	-34,09	-33,87	-35,51	-30,58	-34,09	-35,08	-33,86	-35,5	-30,57	-34,08	0,99	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,99	-0,01
2,34	1,25	-4,86	-86,16	-85,90	-37,98	-32,61	-36,16	-86,15	-135,9	-37,97	-32,6	-36,15	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
2,34	1,25	-3,86	-87,88	-87,59	-40,11	-35,52	-37,88	-88,88	-137,6	-40,1	-35,5	-37,88	1,00	0,00	-0,01	-0,02	0,00	1,00	0,00
2,34	1,25	-2,86	-89,35	-89,03	-42,00	-39,83	-39,35	-91,34	-139	-41,99	-39,81	-39,34	1,99	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	1,99	0,00
2,34	1,25	-1,86	-90,62	-90,27	-43,70	-43,56	-40,62	-92,61	-140,3	-43,7	-43,54	-40,61	1,99	0,00	0,00	-0,01	-0,01	1,99	0,00
2,34	1,25	-0,86	-91,73	-91,36	-45,26	-46,84	-41,73	-91,73	-141,4	-45,25	-46,83	-41,73	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
2,34	1,25	0,14	-92,73	-92,34	-46,70	-49,77	-42,73	-94,72	-142,3	-46,69	-49,75	-42,72	1,99	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	1,99	0,00
2,34	1,25	1,14	-93,62	-93,22	-48,04	-52,40	-43,62	-93,62	-143,2	-48,03	-52,39	-43,62	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
2,34	1,25	2,14	-94,44	-94,02	-49,30	-54,80	-44,44	-94,44	-144	-49,3	-54,8	-44,44	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
2,34	1,25	3,14	-95,19	-94,75	-50,50	-57,01	-45,19	-97,19	-144,8	-50,5	-57	-45,19	2,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	2,00	0,00
2,34	1,25	4,14	-95,88	-95,43	-51,65	-59,04	-45,88	-95,88	-145,4	-51,64	-59,03	-45,88	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
2,34	1,25	5,14	-96,52	-96,06	-52,74	-60,93	-46,52	-97,52	-146,1	-52,74	-60,92	-46,52	1,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	1,00	0,00
3,34	1,25	-9,86	-31,48	-31,31	-32,53	-28,02	-31,48	-81,48	-131,3	-32,54	-28,02	-31,48	50,00	0,00	0,01	0,00	0,00	50,00	0,00
3,34	1,25	-8,86	-30,98	-30,82	-31,98	-27,53	-30,98	-81,98	-130,82	-31,98	-27,53	-30,98	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
3,34	1,25	-7,86	-31,83	-31,66	-32,93	-28,36	-31,83	-81,82	-131,65	-32,92	-28,36	-31,82	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
3,34	1,25	-6,86	-33,47	-33,26	-34,79	-29,97	-33,47	-83,47	-133,25	-34,78	-29,96	-33,46	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
3,34	1,25	-5,86	-35,25	-35,01	-36,89	-31,72	-35,25	-85,25	-135,01	-36,88	-31,71	-35,25	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
3,34	1,25	-4,86	-86,92	-86,65	-38,91	-33,36	-36,92	-86,92	-136,6	-38,91	-33,35	-36,92	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
3,34	1,25	-3,86	-88,42	-88,11	-40,79	-37,09	-38,42	-88,41	-138,1	-40,78	-37,07	-38,41	-0,01	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	-0,01	0,00
3,34	1,25	-2,86	-89,74	-89,41	-42,52	-40,97	-39,74	-90,73	-139,4	-42,51	-40,96	-39,73	0,99	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,99	0,00
3,34	1,25	-1,86	-90,91	-90,56	-44,11	-44,43	-40,91	-91,91	-140,6	-44,1	-44,41	-40,91	1,00	0,00	-0,01	-0,02	0,00	1,00	0,00
3,34	1,25	-0,86	-91,96	-91,59	-45,59	-47,52	-41,96	-92,96	-141,6	-45,58	-47,51	-41,96	1,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	1,00	0,00
3,34	1,25	0,14	-92,91	-92,52	-46,97	-50,31	-42,91	-93,91	-142,5	-46,96	-50,3	-42,91	1,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	1,00	0,00
3,34	1,25	1,14	-93,78	-93,37	-48,27	-52,85	-43,78	-93,77	-143,4	-48,27	-52,84	-43,77	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
3,34	1,25	2,14	-94,57	-94,14	-49,51	-55,18	-44,57	-94,56	-144,1	-49,5	-55,17	-44,56	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
3,34	1,25	3,14	-95,30	-94,86	-50,68	-57,32	-45,30	-96,29	-144,9	-50,68	-57,31	-45,29	0,99	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,99	0,00
3,34	1,25	4,14	-95,97	-95,52	-51,80	-59,31	-45,97	-97,97	-145,5	-51,8	-59,3	-45,97	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
3,34	1,25	5,14	-96,60	-96,14	-52,88	-61,16	-46,60	-98,6	-146,1	-52,88	-61,15	-46,6	2,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	2,00	0,00
4,34	1,25	-9,86	-34,17	-33,95	-35,61	-30,66	-34,17	-84,18	-134	-35,62	-30,66	-34,18	50,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00
4,34	1,25	-8,86	-33,91	-33,70	-35,31	-30,40	-33,91	-84,91	-133,7	-35,31	-30,4	-33,91	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
4,34	1,25	-7,86	-34,37	-34,15	-35,84	-30,85	-34,37	-85,36	-134,1	-35,84	-30,85	-34,36	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
4,34	1,25	-6,86	-35,36	-35,12	-37,02	-31,83	-35,36	-86,36	-135,12	-37,01	-31,82	-35,36	1,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	1,00	0,00
4,34	1,25	-5,86	-36,61	-36,34	-38,52	-33,05	-36,61	-87,6	-136,33	-38,52	-33,04	-36,6	0,99	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,99	-0,01
4,34	1,25	-4,86	-87,89	-87,60	-40,13	-35,55	-37,89	-87,89	-137,6	-40,12	-35,54	-37,89	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
4,34	1,25	-3,86	-89,13	-88,81	-41,72	-39,19	-39,13	-90,12	-138,8	-41,71	-39,17	-39,12	0,99	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	0,99	0,00
4,34	1,25	-2,86	-90,28	-89,94	-43,24	-42,56	-40,28	-91,27	-139,9	-43,24	-42,55	-40,27	0,99	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,99	0,00
4,34	1,25	-1,86	-91,33	-90,97	-44,69	-45,66	-41,33	-91,33	-141	-44,69	-45,65	-41,33	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
4,34	1,25	-0,86	-92,30	-91,92	-46,07	-48,51	-42,30	-93,29	-141,9	-46,06	-48,49	-42,29	0,99	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	0,99	0,00
4,34	1,25	0,14	-93,18	-92,79	-47,38	-51,11	-43,18	-93,18	-142,8	-47,37	-51,1	-43,18	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
4,34	1,25	1,14	-94,00	-93,59	-48,62	-53,51	-44,00	-95	-143,6	-48,61	-53,51	-44	1,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	1,00	0,00
4,34	1,25	2,14	-94,76	-94,33	-49,81	-55,74	-44,76	-96,75	-144,3	-49,8	-55,73	-44,75	1,99	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	1,99	0,00
4,34	1,25	3,14	-95,46	-95,02	-50,94	-57,80	-45,46	-98,45	-145	-50,94	-57,79	-45,45	0,99	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,99	0,00
4,34	1,25	4,14	-96,11	-95,66	-52,04	-59,72	-46,11	-97,11	-145,7	-52,03	-59,71	-46,11	1,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	1,00	0,00
4,34	1,25	5,14	-96,72	-96,26	-53,09	-61,52	-46,72	-96,72	-146,3	-53,09	-61,51	-46,72	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
5,34	1,25	-9,86	-36,30	-36,04	-38,15	-32,75	-36,30	-86,3	-136	-38,15	-32,75	-36,3	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	0,00
5,34	1,25	-8,86	-36,14	-35,88	-37,95	-32,59	-36,14	-86,14	-135,88	-37,95	-32,59	-36,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,34	1,25	-7,86	-36,42	-36,16	-38,30	-32,86	-36,42	-87,42	-136,16	-38,29	-32,86	-36,42	1,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	1,00	0,00
5,34	1,25	-6,86	-37,07	-36,80	-39,10	-33,50	-37,07	-88,07	-136,79	-39,1	-33,5	-37,07	1,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	1,00	-0,01
5,34	1,25	-5,86	-37,96	-37,66	-40,20	-35,73	-37,96	-88,95	-137,66	-40,2	-35,72	-37,95	0,99	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,99	0,00
5,34	1,25	-4,86	-88,94	-88,63	-41,47	-38,63	-38,94	-88,94	-138,6	-41,46	-38,62	-38,94	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
5,34	1,25	-3,86	-89,94	-89,61	-42,79	-41,58	-39,94	-91,94	-139,6	-42,79	-41,57	-39,94	2,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	2,00	0,00
5,34	1,25	-2,86	-90,92	-90,57	-44,12	-44,45	-40,92	-91,91	-140,6	-44,11	-44,43	-40,91	0,99	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	0,99	0,00
5,34	1,25	-1,86	-91,84	-91,47	-45,42	-47,17	-41,84	-91,84	-141,5	-45,41	-47,16	-41,84	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
5,34	1,25	-0,86	-92,71	-92,33	-46,68	-49,73	-42,71	-92,71	-142,3	-46,67	-49,72	-42,71	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
5,34	1,25	0,14	-93,53	-93,13	-47,89	-52,12	-43,53	-93,52	-143,1	-47,89	-52,11	-43,52	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
5,34	1,25	1,14	-94,29	-93,87	-49,07	-54,36	-44,29	-96,29	-143,9	-49,06	-54,35	-44,29	2,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	2,00	0,00
5,34	1,25	2,14	-95,00	-94,57	-50,20	-56,45	-45,00	-96	-144,6	-50,19	-56,44	-45	1,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	1,00	0,00
5,34	1,25	3,14	-95,67	-95,22	-51,29	-58,41	-45,67	-96,66	-145,2	-51,29	-58,4	-45,66	0,99	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,99	

### B.3 Prueba de propagación (Planta Baja, Punto Acceso lateral)

Planta	X	Z	Prop. Directa	Prop. Multipa	Prop. Conjunt	Prop. Multi-W	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motte	Manual
0	-59	-3.5	-63.76	-73.85	-63.35	-80.31	-51.44	-58.67	-58.26	-66
0	-57	-3.5	-65.01	-74.95	-64.59	-81.54	-53.6	-62.35	-59.51	-63
0	-55	-3.5	-66.1	-76.32	-65.71	-82.61	-55.6	-65.58	-60.6	-62
0	-53	-3.5	-68.08	-77.93	-67.65	-83.57	-57.5	-68.46	-61.58	-67
0	-51	-3.5	-66.97	-78.22	-66.65	-84.44	-59.3	-71.06	-62.47	-66
0	-49	-3.5	-67.77	-80.41	-67.54	-85.22	-61.02	-73.42	-63.27	-67
0	-47	-3.5	-68.51	-80.4	-68.23	-85.95	-62.68	-75.59	-64.01	-70
0	-45	-3.5	-69.19	-81.65	-68.95	-86.61	-64.28	-77.59	-64.69	-71
0	-43	-3.5	-75.82	-81.92	-74.87	-97.23	-65.84	-79.45	-65.32	-74
0	-41	-3.5	-76.41	-82.86	-75.52	-97.81	-67.36	-81.18	-65.91	-76
0	-38	-3.5	-76.23	-83.88	-75.54	-98.61	-69.57	-83.59	-66.73	-74
0	-36	-3.5	-78.73	-85.29	-77.87	-99.11	-71	-85.08	-67.23	-76
0	-34	-3.5	-79.21	-85.88	-78.37	-99.58	-72.41	-86.49	-67.71	-73
0	-31	-3.5	-81.89	-86.68	-80.64	-105.24	-74.48	-88.47	-68.39	-74
0	-29	-3.5	-83.31	-86.55	-81.62	-110.65	-75.83	-89.71	-68.81	-73
0	-27	-3.5	-84.71	-87.36	-82.83	-111.05	-77.17	-90.9	-69.21	-71
0	-25	-3.5	-85.1	-87.59	-83.16	-111.43	-78.48	-92.03	-69.6	-72
0	-23	-3.5	-84.47	-88	-82.87	-111.79	-79.78	-93.12	-69.97	-77
0	-20	-3.5	-85.99	-88.88	-84.19	-112.31	-81.71	-94.67	-70.49	-77
0	-17	-3.5	-87.49	-89.96	-85.54	-112.79	-83.61	-96.13	-70.99	-74
0	-14	-3.5	-86.96	-90.58	-85.39	-113.26	-85.48	-97.51	-71.46	-78
0	-12	-3.5	-87.26	-91.16	-85.78	-113.55	-86.71	-98.4	-71.76	-74
0	-10	-3.5	-88.55	-91.31	-86.7	-113.84	-87.93	-99.25	-72.05	-81
0	-7	-3.5	-87.97	-91.7	-86.44	-114.25	-89.75	-100.49	-72.47	-76
0	-5	-3.5	-87.24	-91.76	-85.93	-114.51	-90.96	-101.28	-72.74	-76
0	-3	-3.5	-89.5	-94.02	-88.19	-124.77	-92.15	-102.04	-73	-80
0	0	-3.5	-89.88	-95.01	-88.72	-125.14	-93.93	-103.15	-73.38	-80
0	3	-3.5	-90.24	-95.43	-89.09	-125.49	-95.7	-104.22	-73.74	-79
0	-28	-6	-83.53	-94.76	-83.22	-110.87	-76.57	-90.37	-69.03	-81
0	-31	-10	-128.02	-104.64	-104.62	-150	-74.89	-88.85	-68.52	-84
0	-30	-6	-89.12	-95.31	-88.19	-120.47	-75.23	-89.16	-68.62	-81
0	-30	-1	-107.1	-100.63	-99.75	-140.46	-75.17	-89.11	-68.6	-82
0	-30	1	-112.13	-103.99	-103.37	-150	-75.27	-89.2	-68.63	-81
0	-30	3	-112.18	-105.68	-104.8	-150	-75.42	-89.34	-68.68	-82
0	-30	5	-106.25	-106.95	-103.58	-140.6	-75.64	-89.54	-68.75	-82
0	-27	1	-110.74	-103.43	-102.69	-150	-77.27	-90.98	-69.24	-82
0	-27	3	-114.78	-105.14	-104.69	-150	-77.41	-91.11	-69.28	-82
0	-34	-6	-82.24	-88.22	-81.26	-109.61	-72.49	-86.57	-67.74	-78
0	-36	-6	-83.76	-90.04	-82.84	-109.14	-71.09	-85.17	-67.26	-79
0	-38	-6	-82.26	-90.2	-81.61	-108.65	-69.66	-83.69	-66.76	-79
0	-38	-1	-95.24	-95.06	-92.14	-128.62	-69.59	-83.62	-66.74	-81
0	-36	-1	-94.74	-94.47	-91.59	-129.12	-71.02	-85.1	-67.24	-82
0	-34	-1	-94.22	-94.74	-91.46	-129.59	-72.43	-86.51	-67.72	-81
0	-36	1	-99.78	-97.34	-95.38	-139.16	-71.14	-85.22	-67.28	-80
0	-34	1	-99.25	-97.71	-95.41	-139.62	-72.54	-86.61	-67.75	-83
0	-36	3	-96.85	-99.18	-94.85	-139.22	-71.33	-85.41	-67.35	-80
0	-34	3	-97.31	-99.44	-95.24	-139.68	-72.71	-86.79	-67.81	-81
0	-41	-1	-82.42	-90.75	-81.82	-117.82	-67.38	-81.21	-65.92	-75
0	-41	1	-89.47	-92.08	-87.57	-137.87	-67.52	-81.37	-65.97	-74
0	-41	3	-83.56	-91.9	-82.97	-117.96	-67.75	-81.63	-66.06	-73
0	-41	5	-80.68	-91.37	-80.32	-118.08	-68.08	-81.98	-66.18	-75
0	-44	-1	-81.52	-89.84	-80.92	-116.94	-65.1	-78.57	-65.02	-73
0	-44	1	-88.58	-91.12	-86.66	-137	-65.26	-78.76	-65.08	-73
0	-44	3	-82.69	-90.62	-82.04	-117.11	-65.52	-79.08	-65.19	-78
0	-44	5	-78.84	-90.59	-78.56	-117.25	-65.89	-79.51	-65.34	-65
0	-43	-6	-77.86	-86.85	-77.35	-107.28	-65.95	-79.58	-65.36	-81
0	-52	-1	-83.56	-85.43	-81.39	-114.04	-58.46	-69.86	-62.06	-71
0	-52	1	-77.68	-85.91	-77.08	-104.16	-58.71	-70.23	-62.18	-70
0	-52	3	-74.89	-85.87	-74.55	-104.36	-59.14	-70.83	-62.39	-67
0	-52	5	-94.16	-92.05	-89.97	-114.63	-59.71	-71.63	-62.66	-74
0	-50	5	-88.9	-89.91	-86.36	-115.35	-61.31	-73.8	-63.4	-70
0	-50	3	-76.67	-87.03	-76.29	-105.13	-60.8	-73.13	-63.17	-65
0	-50	1	-77.5	-86.96	-77.03	-104.96	-60.43	-72.63	-63	-73
0	-50	-1	-82.4	-86.34	-80.92	-114.86	-60.21	-72.32	-62.9	-65
0	-48	-1	-80.16	-87.34	-79.4	-105.61	-61.9	-74.57	-63.66	-64
0	-48	1	-80.25	-87.97	-79.57	-115.69	-62.09	-74.83	-63.75	-72
0	-48	3	-75.39	-87.43	-75.13	-105.84	-62.42	-75.25	-63.89	-74
0	-48	5	-77.59	-88.69	-77.26	-106.03	-62.87	-75.83	-64.09	-78
0	-49	-8	-91.97	-96.81	-90.74	-115.43	-61.48	-74.02	-63.47	-81
0	-49	-10	-100.17	-101.66	-97.84	-125.61	-61.91	-74.59	-63.67	-80
0	-46	-13	-102.47	-110.04	-101.77	-136.9	-64.98	-78.43	-64.97	-81
0	-49	-13	-96.55	-106.27	-96.11	-115.99	-62.78	-75.71	-64.05	-80
0	-52	-13	-113.54	-106.12	-105.39	-135	-60.52	-72.74	-63.04	-75
0	-52	-7	-93.71	-91.88	-89.69	-114.18	-58.76	-70.3	-62.21	-73
0	-55	-1	-76.14	-79.48	-74.49	-102.64	-55.67	-65.68	-60.64	-65
0	-55	1	-72.31	-78.46	-71.37	-102.81	-55.99	-66.18	-60.81	-63
0	-55	3	-69.58	-77.89	-68.99	-93.08	-56.52	-66.99	-61.08	-64
0	-57	-1	-76.05	-78.22	-73.99	-111.58	-53.67	-62.48	-59.55	-64
0	-57	1	-66.27	-77.86	-65.98	-91.79	-54.06	-63.12	-59.77	-60

Tabla 37 Datos de cobertura comparados con mediciones reales (Planta Baja - 1)

Planta	X	Z	Prop. Directa	Prop. Multipa	Prop. Conjunt	Prop. Multi-W	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motle	Manual
0	-57	3	-67.61	-77.22	-67.16	-92.13	-54.69	-64.14	-60.11	-60
0	-59	-1	-70.81	-77.44	-69.96	-100.36	-51.54	-58.84	-58.31	-55
0	-59	1	-65.1	-76.83	-64.82	-90.64	-52.02	-59.68	-58.6	-60
0	-59	3	-65.54	-76.46	-65.2	-91.08	-52.78	-60.99	-59.04	-59
0	-61	-1	-67.38	-76.1	-66.84	-88.96	-49.22	-54.64	-56.88	-59
0	-61	1	-63.77	-75	-63.46	-89.35	-49.83	-55.78	-57.27	-55
0	-61	3	-64.36	-74.76	-63.98	-89.93	-50.79	-57.52	-57.86	-61
0	-63	-1	-64.7	-74.74	-64.29	-87.31	-46.65	-49.68	-55.2	-66
0	-63	1	-63.26	-74.14	-62.92	-87.86	-47.48	-51.32	-55.76	-55
0	-63	3	-64.07	-73.5	-63.6	-88.65	-48.72	-53.71	-56.57	-57
0	-65	-1	-59.66	-73.79	-59.49	-85.31	-43.76	-43.68	-53.16	-57
0	-65	1	-61.51	-72.57	-61.18	-86.15	-44.95	-46.19	-54.01	-57
0	-65	3	-63.67	-73.01	-63.19	-97.28	-46.61	-49.59	-55.17	-53
0	-61	-3.5	-62.31	-71.51	-61.81	-78.89	-49.09	-54.41	-56.81	-59
0	-63	-3.5	-60.58	-69.96	-60.11	-77.2	-46.49	-49.34	-55.08	-60
0	-65	-3.5	-58.47	-68.2	-58.03	-75.13	-43.51	-43.14	-52.97	-58
0	-67	-3.5	-52.78	-65.16	-52.54	-72.49	-39.99	-35.23	-50.28	-54
0	-67	-1	-52.12	-66.57	-51.96	-72.82	-40.41	-36.2	-50.62	-53
0	-67	1	-54.53	-63.65	-54.03	-74.21	-42.25	-40.38	-52.03	-53
0	-67	3	-56.23	-65.38	-55.73	-75.87	-44.55	-45.36	-53.73	-47
0	-67	7	-58.36	-69.43	-58.03	-78.94	-49.18	-54.57	-56.86	-57
0	-67	10	-61.3	-69.96	-60.74	-80.84	-52.36	-60.27	-58.8	-57
0	-67	13	-62.94	-71.33	-62.35	-82.45	-55.29	-65.09	-60.44	-54
0	-67	-7	-57.76	-68.87	-57.43	-74.43	-42.55	-41.04	-52.26	-49
0	-67	-10	-60.29	-71.07	-59.94	-76.91	-46.05	-48.47	-54.79	-57
0	-67	-13	-62.55	-71.96	-62.08	-79.13	-49.48	-55.12	-57.05	-55
0	-69	-13	-62.98	-71.42	-62.4	-78.57	-48.59	-53.46	-56.48	-51
0	-72	-13	-60.65	-71.35	-60.29	-78.24	-48.08	-52.48	-56.15	-53
0	-75	-13	-62.04	-69.96	-61.39	-78.63	-48.68	-53.63	-56.54	-52
0	-75	-11	-59.36	-68.36	-58.84	-76.98	-46.15	-48.67	-54.86	-48
0	-75	-8	-51.25	-61.96	-50.9	-63.93	-41.87	-39.54	-51.75	-54
0	-72	-8	-50.98	-61.36	-50.6	-62.69	-40.24	-35.82	-50.48	-45
0	-69	-8	-52.08	-61.79	-51.64	-63.76	-41.65	-39.04	-51.58	-48
0	-69	-11	-60.27	-69.43	-59.77	-76.89	-46.03	-48.43	-54.77	-54
0	-72	-11	-58.77	-69.39	-58.41	-76.4	-45.32	-46.96	-54.27	-47
0	-69	12	-62.13	-70.45	-61.54	-81.66	-53.82	-62.73	-59.63	-50
0	-72	12	-60.97	-70.31	-60.49	-81.5	-53.54	-62.26	-59.47	-54
0	-75	12	-63.16	-69.73	-62.3	-81.69	-53.87	-62.81	-59.66	-55
0	-69	10	-59.93	-70.16	-59.53	-80.48	-51.73	-59.17	-58.43	-58
0	-72	10	-61.71	-69.79	-61.08	-80.27	-51.37	-58.55	-58.21	-44
0	-75	10	-61.96	-69.2	-61.21	-80.51	-51.79	-59.28	-58.46	-50
0	-69	8	-59.54	-69.47	-59.12	-79.12	-49.47	-55.1	-57.04	-54
0	-72	8	-59.25	-68.72	-58.78	-78.83	-49	-54.24	-56.75	-51
0	-75	8	-59.59	-69.1	-59.13	-79.17	-49.54	-55.25	-57.09	-47
0	-69	6	-57.93	-67.99	-57.52	-77.54	-47	-50.36	-55.43	-48
0	-72	6	-57.5	-67.19	-57.06	-77.12	-46.37	-49.11	-55	-45
0	-75	6	-58	-68.05	-57.59	-77.61	-47.1	-50.57	-55.5	-42
0	-69	4	-57.02	-65	-56.38	-75.67	-44.26	-44.75	-53.52	-50
0	-72	4	-55.35	-63.5	-54.73	-75.01	-43.34	-42.77	-52.85	-48
0	-75	4	-55.13	-64.1	-54.61	-75.78	-44.42	-45.08	-53.63	-51
0	-69	2	-52.75	-63.75	-52.42	-73.44	-41.22	-38.07	-51.25	-47
0	-72	2	-51.56	-61.83	-51.17	-72.27	-39.7	-34.56	-50.06	-41
0	-75	2	-54.93	-61.43	-54.06	-73.62	-41.46	-38.61	-51.43	-35
0	-69	0	-48.17	-61.91	-47.99	-60.91	-37.99	-32.62	-48.67	-47
0	-72	0	-46.74	-61.96	-46.61	-58.52	-35.1	-30.23	-46.24	-25
0	-75	0	-49.49	-62.31	-49.27	-61.23	-38.38	-32.93	-48.99	-26
0	-69	-2	-47.04	-59.55	-46.8	-58.82	-35.46	-30.53	-46.54	-43
0	-72	-2	-40.94	-59.33	-40.88	-53.83	-29.75	-25.53	-41.44	-25
0	-75	-2	-46.55	-59.05	-46.31	-59.32	-36.05	-31.03	-47.05	-38
0	-69	-4	-46.23	-57.21	-45.9	-59.01	-35.68	-30.72	-46.73	-44
0	-72	-4	-42.53	-56.76	-42.37	-54.4	-30.38	-26.11	-42.03	-42
0	-75	-4	-46.72	-55.92	-46.23	-59.49	-36.26	-31.2	-47.22	-48
0	-69	-6	-49.52	-59.55	-49.11	-61.26	-38.42	-32.96	-49.02	-54
0	-72	-6	-46.33	-56.74	-45.95	-59.11	-35.8	-30.81	-46.83	-52
0	-75	-6	-50.82	-57.23	-49.93	-61.55	-38.79	-33.25	-49.32	-53
0	-49	-6	-78.84	-90.02	-78.52	-105.29	-61.18	-73.63	-63.34	-78

Tabla 38 Datos de cobertura comparados con mediciones reales (Planta Baja - 2)



### B.4 Prueba de propagación (Bajocubierta)

X	Z	Prop. Directa	Prop. Multipath	Prop. Conjunta	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Morley	Medida Reales
-18	2	-73.81	-79.76	-72.83	-96.3	-56.96	-67.65	-48.81	-78
-16	2	-82.8	-79.46	-77.8	-119.31	-55.04	-64.69	-47.8	-77
-14	2	-68.67	-72.13	-67.05	-94.2	-53	-61.36	-46.67	-69
-13	2	-69.04	-73.43	-67.7	-93.59	-51.93	-59.52	-46.04	-64
-11	2	-64.65	-67.85	-62.95	-80.23	-49.64	-55.43	-44.65	-60
-9	2	-66.02	-72	-65.04	-90.63	-47.13	-50.63	-43.02	-61
-8	2	-58.08	-65.51	-57.36	-77.71	-45.76	-47.87	-42.08	-62
-6	2	-51.9	-65.19	-51.7	-63.56	-42.73	-41.44	-39.9	-58
-4	2	-48.15	-58.32	-47.75	-60.87	-39.19	-33.58	-37.15	-48
-3	2	-51.53	-57.97	-50.64	-77.28	-37.22	-31.99	-35.53	-47
-1	2	-38.19	-51.78	-38.01	-44.01	-33.34	-28.72	-32.19	-44
0	2	-38.29	-53.75	-38.16	-43.12	-32.32	-27.83	-31.29	-49
1	2	-38.63	-55.3	-38.54	-43.46	-32.71	-28.17	-31.63	-41
3	2	-41.71	-45.71	-40.26	-46.48	-36.25	-31.19	-34.71	-30
4	2	-55.4	-58.98	-53.82	-78.14	-38.27	-32.84	-36.4	-53
6	2	-57.3	-62.79	-56.22	-80.98	-41.94	-39.69	-39.3	-50
8	2	-61.61	-63.28	-59.35	-83.24	-45.08	-46.47	-41.61	-59
9	2	-57.59	-63.4	-56.57	-78.2	-46.49	-49.35	-42.59	-58

Tabla 39 Resultados ZonaWiFi - Bajocubierta Línea A

X	Z	Prop. Directa	Prop. Multipath	Prop. Conjunta	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Morley	Medida Reales
-11	0.25	-44.5	-56.4	-44.23	-44.08	-49.4	-54.97	-44.5	-46
-9	0.25	-44.79	-55.4	-44.43	-42.4	-46.79	-49.96	-42.79	-48
-7	0.25	-41.69	-51.36	-41.24	-40.34	-43.8	-43.77	-40.69	-52
-6	0.25	-41.42	-52.19	-41.07	-39.1	-42.1	-40.05	-39.42	-47
-4	0.25	-37.23	-48.65	-36.92	-35.97	-38.06	-32.67	-36.23	-45
-3	0.25	-35.13	-46.54	-34.82	-33.91	-35.56	-30.61	-34.13	-40
-2	0.25	-31.52	-45.51	-31.35	-31.36	-32.59	-28.06	-31.52	-31
-1	0.25	-28.39	-41.9	-28.2	-28.28	-29.15	-24.99	-28.39	-26
2	0.25	-32.09	-44.71	-31.86	-29.95	-30.99	-26.65	-30.09	-28
3	0.25	-34.96	-45.63	-34.61	-32.77	-34.21	-29.47	-32.96	-26
4	0.25	-35.28	-46.99	-35	-35.04	-36.92	-31.75	-35.28	-46
5	0.25	-37.17	-50.26	-36.97	-36.9	-39.22	-33.6	-37.17	-27
6	0.25	-38.76	-51.71	-38.54	-38.45	-41.23	-38.09	-38.76	-42
7	0.25	-40.11	-53.39	-39.91	-39.77	-43.02	-42.07	-40.11	-52

Tabla 40 Resultados ZonaWiFi - Bajocubierta Línea B

X	Z	Prop. Directa	Prop. Multipath	Prop. Conjunta	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Morley	Medida Reales
-18	-2	-49.79	-67.91	-49.73	-48.29	-56.93	-67.61	-48.79	-67
-16	-2	-57.78	-62.53	-56.53	-71.3	-55	-64.63	-47.78	-67
-14	-2	-54.64	-62.67	-54.01	-70.18	-52.96	-61.29	-46.64	-62
-13	-2	-58.02	-64.15	-57.07	-81.56	-51.88	-59.44	-46.02	-65
-11	-2	-56.61	-61	-55.26	-80.19	-49.58	-55.32	-44.61	-64
-9	-2	-60.96	-62.99	-58.85	-90.57	-47.04	-50.46	-42.96	-63
-6	-2	-58.78	-58.8	-55.78	-93.45	-42.57	-41.1	-39.78	-60
-4	-2	-46.93	-56.9	-46.51	-66.66	-38.92	-33.36	-36.93	-58
-3	-2	-46.21	-53.66	-45.49	-70.97	-36.83	-31.67	-35.21	-54
-1	-2	-33.48	-46.49	-33.27	-43.31	-32.54	-28.02	-31.48	-46
1	-2	-33.81	-43.28	-33.35	-42.66	-31.8	-27.37	-30.81	-45
3	-2	-39.32	-49.03	-38.88	-58.1	-35.79	-30.81	-34.32	-38
4	-2	-47.14	-55.01	-46.48	-71.88	-37.95	-32.59	-36.14	-50
6	-2	-50.17	-57.45	-49.42	-74.85	-41.77	-39.3	-39.17	-54
8	-2	-51.53	-58.49	-50.73	-65.16	-44.97	-46.24	-41.53	-58
9	-2	-51.52	-58	-50.64	-66.14	-46.4	-49.17	-42.52	-65

Tabla 41 Resultados ZonaWiFi - Bajocubierta Línea C

X	Z	distancia al AP	Prop. Directa	Prop. Multipath	Prop. Conjunta	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley	Medida Reales
13	-11,5	17,32772345	-113,34	-82,17	-82,17	-107,85	-56,06	-66,28	-48,34	-77
13	-9,5	16,00781059	-108,66	-80,41	-80,41	-107,18	-54,78	-64,28	-47,66	-74
13	-7,5	14,84082208	-90,02	-76,94	-76,73	-106,55	-53,62	-62,39	-47,02	-68
13	-5,5	13,86542462	-80,45	-76,16	-74,79	-129,99	-52,62	-60,71	-46,45	-70
13	-3,5	13,12440475	-74,99	-74,69	-71,83	-117,54	-51,84	-59,37	-45,99	-68
13	6	13,65650028	-77,53	-81,79	-76,14	-112,06	-52,75	-60,94	-46,53	-66
13	8	14,57737974	-75,11	-80,86	-74,09	-106,64	-53,78	-62,66	-47,11	-79
13	10	15,70031847	-85,76	-81,03	-79,77	-83,28	-54,97	-64,58	-47,76	-73
13	12	16,98528775	-115,44	-82,36	-82,36	-101,95	-56,25	-66,58	-48,44	-76
13	14	18,39836949	-123,13	-98,7	-98,68	-102,62	-57,6	-68,61	-49,13	-79

Tabla 42 Resultados ZonaWiFi - Bajocubierta Línea D

X	Z	distancia al AP	Prop. Directa	Prop. Multipath	Prop. Conjunta	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley	Medida Reales
11	-11,5	15,94521872	-112,6	-80,19	-80,18	-107,12	-54,67	-64,1	-47,6	-77
11	-9,5	14,5	-111,79	-79,78	-79,78	-106,32	-53,21	-61,7	-46,79	-71
11	-7,5	13,20037878	-107,99	-76,62	-76,62	-105,54	-51,83	-59,36	-45,99	-71
11	-5,5	12,09338662	-93,25	-74,08	-74,02	-116,82	-50,61	-57,19	-45,25	-65
11	-3,5	11,23610253	-80,65	-75,06	-74	-128,22	-49,63	-55,41	-44,65	-78
11	6	11,85326959	-75,35	-76,41	-72,84	-116,92	-50,78	-57,49	-45,35	-73
11	8	12,9034879	-90,1	-77,49	-77,26	-93,65	-52,03	-59,69	-46,1	-67
11	10	14,15980226	-109,91	-79,47	-79,47	-94,44	-53,42	-62,06	-46,91	-71
11	12	15,5724115	-111,72	-81,82	-81,81	-95,24	-54,89	-64,46	-47,72	-74
11	14	17,10263138	-123,52	-95,62	-95,62	-102,02	-56,4	-66,81	-48,52	-75

Tabla 43 Resultados ZonaWiFi - Bajocubierta Línea E

X	Z	distancia al AP	Prop. Directa	Prop. Multipath	Prop. Conjunta	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley	Medida Reales
9	-11,5	14,70544117	-105,87	-80,51	-80,5	-94,41	-53,36	-61,96	-46,87	-74
9	-9,5	13,12440475	-104,9	-78,38	-78,37	-93,45	-51,68	-59,09	-45,9	-71
9	-7,5	11,67261753	-109,9	-76,32	-76,32	-104,47	-50,04	-56,16	-44,9	-68
9	-5,5	10,40432602	-110,94	-73,97	-73,97	-115,53	-48,52	-53,32	-43,94	-65
9	-3,5	9,394147114	-76,1	-67,97	-67,34	-126,71	-47,25	-50,86	-43,1	-63
9	-2	8,860022573	-51,52	-58	-50,64	-66,14	-46,4	-49,17	-42,52	-65
9	-1	8,631338251	-42,37	-54,6	-42,12	-41,99	-46,18	-48,73	-42,37	-58
9	0	8,514693183	-44,34	-54,98	-43,98	-41,96	-46,12	-48,61	-42,34	-53
9	1	8,514693183	-49,41	-59,51	-49	-54,03	-46,23	-48,83	-42,41	-58
9	2	8,631338251	-57,59	-63,4	-56,57	-78,2	-46,49	-49,35	-42,59	-58
9	3	8,860022573	-67,86	-65,79	-63,69	-96,47	-46,89	-50,16	-42,86	-65
9	6	10,12422837	-93,07	-74,82	-74,75	-103,66	-48,73	-53,73	-44,07	-71
9	8	11,33578405	-108,05	-77,85	-77,85	-92,61	-50,27	-56,59	-45,05	-66
9	10	12,74754878	-108,04	-78,75	-78,75	-93,59	-51,92	-59,52	-46,04	-77
9	12	14,30034965	-111,02	-81,18	-81,17	-94,54	-53,61	-62,38	-47,02	-75
9	14	15,95305613	-116,94	-94,91	-94,88	-89,45	-55,3	-65,1	-47,94	-77

Tabla 44 Resultados ZonaWiFi - Bajocubierta Línea F

X	Z	distancia al AP	Prop. Directa	Prop. Multipath	Prop. Conjunta	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley	Medida Reales
-11	-10	15,5724115	-109	-81,48	-81,47	-106,52	-53,58	-62,32	-47	-79
-11	-8	14,30034965	-114,24	-78,88	-78,88	-117,78	-52,26	-60,09	-46,24	-78
-11	-6	13,20984481	-118,55	-76,81	-76,81	-129,1	-51,09	-58,06	-45,55	-76
-11	-4	12,34908904	-73,98	-71,6	-69,62	-104,55	-50,17	-56,4	-44,98	-64
-11	-2	11,7686023	-56,61	-61	-55,26	-80,19	-49,58	-55,32	-44,61	-64
-11	-1	11,5974135	-44,52	-56,87	-44,28	-44,1	-49,43	-55,05	-44,52	-61
-11	0,25	11,50271707	-44,5	-56,4	-44,23	-44,08	-49,4	-54,97	-44,5	-46
-11	2	11,5974135	-64,65	-67,85	-62,95	-80,23	-49,64	-55,43	-44,65	-60
-11	4	12,02081528	-73,06	-72,74	-69,88	-104,62	-50,29	-56,61	-45,06	-71
-11	6	12,74754878	-72,64	-75,65	-70,88	-105,2	-51,25	-58,34	-45,64	-72

Tabla 45 Resultados ZonaWiFi - Bajocubierta Línea G

X	Z	distancia al AP	Prop. Directa	Prop. Multipath	Prop. Conjunta	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley	Medida Reales
-14	-6	15,89024858	-102,26	-78,95	-78,93	-130,78	-54,04	-63,09	-47,26	-72
-14	-4	15,18222645	-81,88	-76,19	-75,16	-130,41	-53,37	-61,98	-46,88	-74
-14	-2	14,71393897	-54,64	-62,67	-54,01	-70,18	-52,96	-61,29	-46,64	-62
-14	-1	14,57737974	-55,59	-68,09	-55,35	-64,12	-52,86	-61,11	-46,59	-70
-14	0	14,50861813	-53,57	-64,84	-53,26	-58,11	-52,83	-61,07	-46,57	-61
-14	2	14,57737974	-68,67	-72,13	-67,05	-94,2	-53	-61,36	-46,67	-69
-14	4	14,91643389	-74,93	-76,81	-72,76	-112,46	-53,46	-62,12	-46,93	-71
-14	6	15,50806242	-74,32	-79,79	-73,24	-106,84	-54,16	-63,28	-47,32	-69

Tabla 46 Resultados ZonaWiFi - Bajocubierta Línea H

X	Z	distancia al AP	Prop. Directa	Prop. Multipath	Prop. Conjunta	Prop. Multi-Wall	Linear Path	Dual Slope	Keenan-Motley	Medida Reales
-18	-6	19,60867155	-90,18	-82,56	-81,87	-144,67	-57,69	-68,75	-49,18	-80
-18	-4	19,03943276	-87,94	-77,02	-76,68	-132,43	-57,21	-68,04	-48,94	-77
-18	-2	18,6681547	-49,79	-67,91	-49,73	-48,29	-56,93	-67,61	-48,79	-67
-18	-1	18,56071119	-63,76	-75,21	-63,46	-78,25	-56,86	-67,5	-48,76	-72
-18	0	18,50675552	-62,75	-72,73	-62,33	-72,24	-56,84	-67,48	-48,75	-70
-18	2	18,56071119	-73,81	-79,76	-72,83	-96,3	-56,96	-67,65	-48,81	-78
-18	4	18,82817038	-81,97	-83,5	-79,66	-120,46	-57,27	-68,13	-48,97	-74
-18	6	19,30025907	-80,22	-85,6	-79,12	-108,71	-57,78	-68,87	-49,22	-74

Tabla 47 Resultados ZonaWiFi - Bajocubierta Línea J