





Universidad de Zaragoza  
Centro Politécnico Superior



## PROYECTO FIN DE CARRERA

### CARACTERIZACIÓN DEL CANAL MÓVIL EN LAS BANDAS DE TRABAJO DE WIMAX A PARTIR DE SIMULACIONES CON MODELOS URBANOS EN 3D.

Autora: María Lavilla Marruedo

Director: Dr. D. Fernando Gutiérrez Soler

Ingeniería de Telecomunicación  
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones  
Área: Teoría de la Señal y Comunicaciones



Zaragoza, Junio 2010



*A mis padres*

## *Agradecimientos*

Quiero agradecer a mi familia el apoyo y los ánimos que me han dado durante estos años, en especial a mis padres y hermanos por entenderme en los peores momentos, y a mis abuelos, por la fe que han puesto en mí.

A Fernando, mi director de proyecto, por la ayuda y disponibilidad prestada para la realización de este proyecto.

A todas mis amigas por el interés y los ánimos constantes, y a los compañeros y amigos que he hecho durante de la carrera, porque me habéis hecho ver este camino de manera diferente.

A todos, gracias.



# CARACTERIZACIÓN DEL CANAL MÓVIL EN LAS BANDAS DE TRABAJO DE WIMAX A PARTIR DE SIMULACIONES CON MODELOS URBANOS EN 3D

## Resumen

El presente proyecto se encuentra enmarcado en el contexto de prestación de servicios de banda ancha por parte de las redes celulares a través de tecnología inalámbrica. Dentro de este ámbito, el estándar con mayor potencial y que actualmente se encuentra en plena expansión es el IEEE 802.16 o más conocido como WIMAX.

Una de las características principales de dicha tecnología son las bandas frecuenciales de trabajo, siendo la más destacada la centrada en 3.5 GHz. Los estudios y caracterizaciones del canal a esta frecuencia son todavía escasos, y su importancia es considerable a la hora de realizar un despliegue de red. Si añadimos que el medio de transmisión es a través de ondas electromagnéticas, el trabajo se hace completamente necesario. Además, los inconvenientes propios del canal radio requieren de una caracterización particular y exhaustiva del entorno en que se desarrolla el sistema con el fin de obtener unos resultados realistas.

Con estos antecedentes, el presente estudio trata de caracterizar el canal móvil en dicha banda frecuencial de forma particular para Zaragoza, tanto en entornos urbanos como suburbanos de la ciudad.

El trabajo se realiza por medio de simulaciones con la herramienta de planificación de redes ICS Telecom. Con los valores obtenidos en ellas, y una vez procesados, se determinan los parámetros fundamentales de la caracterización de primer orden, así como los más interesantes de segundo orden.

A partir de estos resultados se realiza una comparación con modelos de propagación estandarizados y con medidas reales realizadas en diferentes entornos, presentes en la bibliografía, con el fin de afianzarlos.



# Tabla de contenido

<b>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1    Contexto .....	1
1.2    Motivación y objetivos .....	2
1.3    Trabajos previos .....	2
1.4    Estructura de la memoria.....	3
<b>Capítulo 2: CARACTERIZACIÓN DEL CANAL MOVIL .....</b>	<b>4</b>
2.1    Introducción .....	4
2.2    Propagación en el entorno móvil .....	4
2.2.1    Propagación en el espacio libre.....	4
2.2.2    Propagación LOS y NLOS .....	5
2.2.3    La difracción .....	5
2.2.4    La reflexión .....	6
2.3    Desvanecimientos de señal.....	7
2.3.1    Desvanecimientos lentos .....	7
2.3.2    Desvanecimientos rápidos .....	8
2.4    Modelos de propagación.....	9
<b>Capítulo 3: HERRAMIENTA Y ENTORNO .....</b>	<b>11</b>
3.1    Introducción .....	11
3.2    Características cartográficas del ICS.....	11
3.2.1    Datos cartográficos. ....	11
3.2.2    Modelo de propagación. ....	13
3.3    Emplazamientos .....	14
3.4    Simulaciones.....	15
3.4.1    Simulación de la cobertura.....	16
3.4.2    Simulación del efecto multicamino .....	16
<b>Capítulo 4: RESULTADOS .....</b>	<b>18</b>
4.1    Introducción .....	18
4.2    Caracterización de las pérdidas de propagación.....	18
4.2.1    Resultados de las simulaciones .....	18
4.2.2    Modelos de propagación obtenidos .....	20
4.2.3    Comparativa con modelos existentes .....	21
4.2.4    Comparativa con medidas reales .....	24

---

4.3	Caracterización del multicamino.....	27
4.3.1	Resultados y procesado.....	27
4.3.2	Perfiles potencia – retardo, PDP .....	27
4.3.3	Ensanchamiento temporal, Ds .....	28
<b>Capítulo 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>		29
5.1	Conclusiones.....	29
5.2	Líneas futuras .....	30
Referencias y bibliografía .....		31
Glosario .....		32
ANEXOS .....		33
<b>Anexo I: MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS .....</b>		34
I.1	Stanford University Interim (SUI) Model.....	34
I.2	COST 231 Hata Model .....	35
I.3	ECC 33 Model .....	36
I.4	COST Walfisch – Ikegami Model.....	37
I.5	Ericsson 9999 Model .....	38
<b>Anexo II: OBTENCIÓN DE RESULTADOS .....</b>		39
II.1	Tratamiento de las pérdidas .....	39
II.2	Tratamiento del multicamino.....	52

## Índice de figuras

Figura 01. Degradación de la señal provocada por los elementos del entorno,[1] .....	4
Figura 02. Modelo de difracción de Fresnel, obstáculo ‘filo de cuchillo’ [ref “Signal propagation modeling in urban environment”-ATDI]. .....	6
Figura 03. Diferentes comportamientos para la reflexión: a) especular o Lambertiana, b) dispersión o scattering, [1].....	7
Figura 04. Efectos nocivos de la propagación en un entorno móvil, [3].....	7
Figura 05. Efecto de dispersión del retardo,[3].....	8
Figura 06. Perfil potencia retardo del canal de comunicaciones, [3].....	8
Figura 07. Imagen 3D del centro de Zaragoza.....	13
Figura 08. Mapa de cobertura con efecto cañón en el centro de Zaragoza. ....	14
Figura 09. Entorno de trabajo, mapa de Zaragoza y estaciones base.....	15
Figura 10. Mapas de cobertura urbana filtrados: a) pérdidas outdoor, b) pérdidas indoor. ....	16
Figura 11. Resultado del análisis multicamino para un punto concreto del mapa.....	17
Figura 12. Ubicación de los suscriptores en el mapa. ....	17
Figura 13. Atenuaciones medias cada 100m para cada EB: a) Entorno suburbano b) Entorno suburbano .....	19
Figura 14. Modelos de pérdidas propagación obtenidos para Zaragoza.....	21
Figura 15. Comparación de modelos empíricos de caracterización de primer orden del canal con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos urbanos.....	22
Figura 16. Comparación de modelos empíricos de caracterización de primer orden del canal con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos suburbanos. ....	24
Figura 17. Comparación de modelos de caracterización de primer orden del canal correspondientes a ciudades del Reino Unido con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos urbanos. ....	25
Figura 18. Comparación de modelos de caracterización de primer orden del canal correspondientes a diferentes ciudades con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos suburbanos.....	26
Figura 19. Perfil potencia retardo de la ciudad de Zaragoza para entornos urbanos .....	27
Figura 20. Pérdidas de propagación correspondientes a modelos empíricos estándar para entornos: a) urbanos, b) suburbanos.....	38
Figura 21. Representación de las pérdidas en función de la distancia para diferentes estaciones base urbanas. Estaciones base: a) EB 8, b) EB 9, c) EB 28 y d) EB 31. ....	41
Figura 22. Representación de las pérdidas en función de la distancia para diferentes estaciones base urbanas, outdoor. Estaciones base: a) EB 8, b) EB 9, c) EB 28 y d) EB 31.....	42
Figura 23. Representación de las pérdidas en función de la distancia para diferentes estaciones base suburbanas. Estaciones base: a) EB 4, b) EB 5, c) EB 18 y d) EB 25. ....	44
Figura 24. Representación de las pérdidas en función de la distancia para diferentes estaciones base suburbanas outdoor. Estaciones base: a) EB 4, b) EB 5, c) EB 18 y d) EB 25. ....	45
Figura 25. Superposición de los promedios de atenuación cada 100 m con las pérdidas de propagación, (EB 8 urbana). ....	46
Figura 26. Superposición de los promedios de atenuación cada 100 m con las pérdidas de propagación, (EB 8 urbana outdoor)....	47

Figura 27. Valores medios de atenuación cada 100 m para cada estación base: a) EB urbanas, b) EB urbanas outdoor, c) EB suburbanas y d) EB suburbanas outdoor.....	48
Figura 28. Valores de desviación típica cada 100 m para cada estación base: a) EB urbanas, b) EB urbanas outdoor, c) EB suburbanas y d) EB suburbanas outdoor. ....	50
Figura 29. Respuesta impulsional del canal asociada a cada usuario. ....	52
Figura 30. Perfiles retardo potencia de estaciones base urbanas: a) EB 6, b) EB 7, c) EB 28 y d) EB 31.....	53
Figura 31. Perfiles retardo potencia de estaciones base suburbanas: a) EB 2, b) EB 3, c) EB 18 y d) EB 25. ....	53

## Índice de tablas

Tabla 01. Características de alta resolución ICS Telecom, [1].....	12
Tabla 02. Características del modelo de propagación utilizado en las simulaciones. .....	13
Tabla 03. Parámetros de caracterización de primer orden del canal móvil para Zaragoza.....	20
Tabla 04. Comparación de modelos empíricos de caracterización de primer orden del canal con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos urbanos.....	22
Tabla 05. Comparación de modelos empíricos de caracterización de primer orden del canal con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos suburbanos.....	23
Tabla 06. Comparación de modelos de caracterización de primer orden del canal correspondientes a ciudades del Reino Unido con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos urbanos.....	25
Tabla 07. Comparación de modelos de caracterización de primer orden del canal correspondientes a diferentes ciudades con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos suburbanos.....	26
Tabla 08: Valores del ensanchamiento temporal para Zaragoza en entornos urbanos y suburbanos.....	28
Tabla 09. Valor de los parámetros del terreno para el modelo SUI.....	35
Tabla 10. Comparación del parámetro delay spread para los distintos entorno. ....	54

---

# MEMORIA

## Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Contexto

La rápida evolución en el campo de las comunicaciones y el constante incremento en las necesidades de los usuarios obligan al desarrollo continuo de nuevas tecnologías y de mejoras en la prestación de servicios. El ámbito de las comunicaciones móviles se está centrándose en redes WLAN (Wireless Local Area Network), las cuales han sido diseñadas para dotar de mayor movilidad a los usuarios finales y por la necesidad de conectarse a la red desde cualquier lugar y en cualquier momento (“anywhere, anytime”). Además, permiten la conectividad desde lugares de difícil acceso donde las soluciones cableadas son complicadas o costosas.

Actualmente, la tecnología con mayor proyección dentro de las redes inalámbricas de área metropolitana (MAN) es WIMAX (World Wide Interoperability for Microwave Access), basada en el estándar IEEE 802.16. Se caracteriza por ofrecer servicios de banda ancha para entornos de difícil acceso mediante ondas radio. Una de sus principales ventajas es la de garantizar la comunicación en entornos NLOS (Non Line of Sight) y en las peores condiciones de propagación. Esto se debe al uso de una modulación adaptativa junto con el sistema de transmisión multiportadora OFDM, además de incorporar potentes técnicas de corrección de errores y de control de potencia. Para mejorar estos servicios ofrecidos, el estándar se ha ampliado a la versión 802.16e, la cual contempla el concepto de movilidad para los receptores y presta especial atención a la calidad de servicio (QoS).

Otra de las características innovadoras de esta tecnología son las frecuencias de trabajo, centradas en 3.5 GHz y 5 GHz, para sistemas con movilidad. Son bandas de frecuencia no utilizadas por sistemas previos, por lo que apenas han sido objeto de estudio y no existen unas caracterizaciones tan exhaustivas como en otros estándares anteriores, dícese GSM o UMTS.

## 1.2 Motivación y objetivos

Para realizar el despliegue de red óptimo de cualquier sistema de comunicaciones, y sobre todo de aquellos que requieren de una planificación celular, se necesita el conocimiento previo del comportamiento que va a tener el sistema. La correcta ubicación de las estaciones base requiere una estimación de los niveles de señal que se van a recibir, de las pérdidas que sufrirá la señal, de los porcentajes de área que van a ser cubiertos o una estimación de las interferencias, entre cuestiones más importantes. Concluimos entonces, que el primer paso para una buena planificación es caracterizar el medio en el que se va a desenvolver el sistema.

A raíz de estas necesidades, y sabiendo que los estudios realizados en estas bandas de frecuencia son insuficientes, el objetivo del presente proyecto es la caracterización del canal móvil mediante simulaciones en la banda de 3.5 GHz, por ser una de las bandas dedicadas para la tecnología WIMAX móvil. El trabajo se va a desarrollar tanto para entornos urbanos como suburbanos y está particularizado para la ciudad de Zaragoza.

Para obtener dicha caracterización se trabajará en dos vías diferentes. La primera de ellas tendrá como objetivo el modelado de primer orden del canal. Para ello se calculará la atenuación sufrida por la señal en el camino de propagación en el entorno descrito. La segunda permitirá obtener dos de los parámetros más importantes del modelado de segundo orden, el Power Delay Profile (PDP) y el Delay Spread (Ds), parámetros relacionados con el efecto multicamino que sufre la señal en su recorrido. Con este conocimiento podemos reducir la repercusión de los dos mayores problemas en una comunicación radio: las interferencias y los desvanecimientos.

El procedimiento se llevará a cabo mediante simulaciones con la herramienta de planificación ICS-Telecom. Este programa permite utilizar modelos de ciudad en 3D, lo que nos aportará unos resultados más realistas al incorporar en sus cálculos técnicas como el trazado de rayos y efectos de propagación como la dispersión, la refracción, la difracción o el efecto cañón.

## 1.3 Trabajos previos

Hasta ahora disponemos de diferentes modelos de propagación estandarizados que nos ayudan a predecir estos comportamientos. El problema reside en que han sido obtenidos para frecuencias de trabajo menores a 2 GHz, ya que son las utilizadas por los sistemas de comunicaciones móviles existentes, y todavía no se ha demostrado su validez para estos nuevos rangos frecuenciales. No obstante existen algunos modelos utilizados para 3.5GHz, aunque son escasos y están pendientes de validación a nivel global.

En la bibliografía se pueden encontrar algunos artículos donde se presentan modelos obtenidos a raíz de medidas experimentales en la banda frecuencial que nos ocupa. Dichas medidas se han realizado en ciudades de diferentes partes del mundo, las cuales se comentarán en el capítulo de resultados.

## 1.4 Estructura de la memoria

Esta memoria está estructurada en cinco capítulos, el primero de ellos, en el que nos encontramos, es una pequeña introducción en la que se describe el contexto global en el que está enmarcado el proyecto, así como las motivaciones y los objetivos que se pretenden. Además se menciona a grandes rasgos el modo de trabajo y las herramientas utilizadas para conseguir dicho fin.

En el capítulo dos se explicarán las cuestiones técnicas de la caracterización del canal móvil y se describirán de forma teórica los parámetros más determinantes y su utilidad.

En el tercer capítulo se describirá en detalle el entorno de trabajo, así como la herramienta informática y las características de las simulaciones.

En el cuarto capítulo se expondrán los resultados obtenidos, tanto en el apartado de pérdidas como en el de multicamino. También se realizarán las comparaciones con modelos teóricos previos y con medidas reales realizadas en otros entornos, con el fin de dotar de mayor validez a nuestros resultados.

Finalmente, en el último capítulo, se expondrán las conclusiones extraídas y se comentarán las posibles líneas de trabajo futuro. A continuación se añadirán unos anexos en los que se analizarán con más detalle algunos resultados intermedios, que por limitaciones del formato no se han podido incluir en la memoria, de forma que para la comprensión completa de este proyecto se recomienda su lectura.

## Capítulo 2: CARACTERIZACIÓN DEL CANAL MOVIL

### 2.1 Introducción

La caracterización del canal móvil es fundamental a la hora de desarrollar cualquier sistema de transmisión. El estudio de los modelos de propagación y el conocimiento previo del comportamiento del sistema sirven de apoyo a la hora de mitigar cualquier inconveniente del canal radio. Se puede realizar de forma analítica mediante funciones de Bello y desarrollos posteriores, aunque resulta un método complejo.

En nuestro caso el interés reside en una serie de características concretas, como son las atenuaciones y los desvanecimientos sufridos por la señal en el camino de propagación. La causa principal de estas degradaciones son las alteraciones que provocan los elementos del entorno en las ondas electromagnéticas, como se observa en la figura:

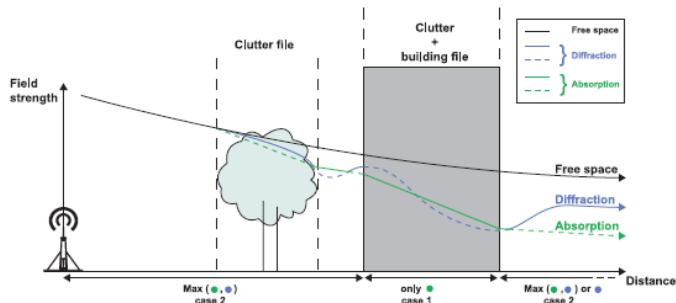


Figura 01. Degradación de la señal provocada por los elementos del entorno,[1].

### 2.2 Propagación en el entorno móvil

#### 2.2.1 Propagación en el espacio libre

La primera consideración en cualquier sistema de transmisión por ondas radio es la atenuación sufrida por la señal en su recorrido entre el emisor y el receptor. Para determinar

estas pérdidas, definidas como la diferencia de potencia entre el transmisor y el receptor, partimos del balance de potencias del enlace, como se muestra en (1)

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_T - L_R - L_{EL} \quad [dB] \quad (1)$$

donde  $P_T$  y  $P_R$  son la potencia transmitida y recibida respectivamente,  $G_T$  y  $G_R$  son las ganancias de transmisión y recepción de las antenas,  $L_T$  y  $L_R$  las pérdidas de los equipos y  $L_{EL}$  las pérdidas en el espacio libre, despejadas en (2):

$$L_{EL} = P_R - P_T + G_T + G_R - L_T - L_R \quad [dB] \quad (2)$$

Estas pérdidas quedan completamente definidas a través de los parámetros de diseños: la distancia de separación de los terminales y la frecuencia central de trabajo, como se muestra en (3):

$$L_{EL} = 20 * \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda} \quad [dB] \quad (3)$$

### 2.2.2 Propagación LOS y NLOS

Otro factor a tener en cuenta en cualquier comunicación radio es la claridad del enlace. Debe mantenerse una cierta distancia entre los obstáculos y el camino de propagación.

Cuando existe línea de visión directa, también llamada LOS (Line of sight), entre el transmisor y el receptor, y además la 1<sup>a</sup> zona del elipsoide de Fresnel está despejada, se dice que las condiciones de propagación se producen en el espacio libre. Sin embargo, la situación más probable en entornos urbanos es que la línea de visión esté obstaculizada por diferentes elementos (árboles, edificios, etc.) que impidan la visibilidad directa, entonces nos encontramos en condiciones NLOS (Non Line of sight). Cuando se produce esta situación la onda electromagnética queda afectada por fenómenos como la difracción, la reflexión o la dispersión.

### 2.2.3 La difracción

La difracción introduce pérdidas por la presencia de obstáculos que se encuentran a lo largo del camino de propagación, los cuales no tienen porque impedir la visión directa entre emisor y receptor para provocarlas, sino que es suficiente con que se encuentren dentro de la zona del primer elipsoide de Fresnel.

La forma más sencilla de considerar este hecho es a través de la teoría de Fresnel, la cual tiene en cuenta la existencia de un único obstáculo en el camino, el llamado ‘filo de cuchillo’ (figura 02) y puede calcularse con el conjunto de integrales que llevan su nombre. Como no tienen solución explícita, se toma como buena aproximación la expresión mostrada en la ecuación (4),[1]:

$$L_d = 6.9 + 20 * \log_{10} \left[ (\nu - 0.1) + \sqrt{1 + (\nu + 0.1)^2} \right] \quad \text{con } \nu = \sqrt{2} \frac{h}{r_1} \quad [dB] \quad (4)$$

donde  $h/r_1$  se conoce como claridad del enlace, con  $h$  la altura del obstáculo respecto a la trayectoria directa. Sus valores varían en función de la posición:  $h=0$ , rasante a la trayectoria,  $h>0$ , la intercepta y  $h<0$ , no la obstruye.  $r_1$  es el radio del primer elipsoide de Fresnel.

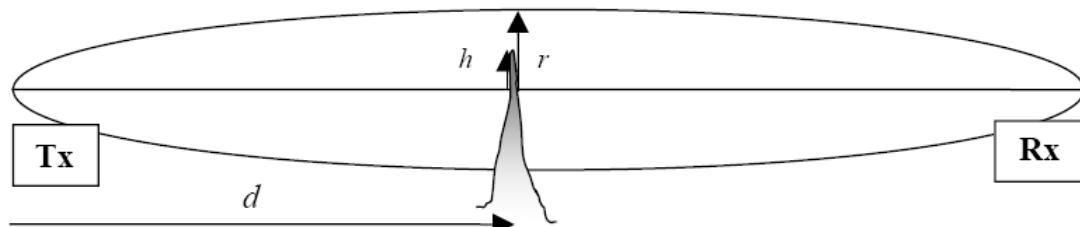


Figura 02. Modelo de difracción de Fresnel, obstáculo 'filo de cuchillo' [2].

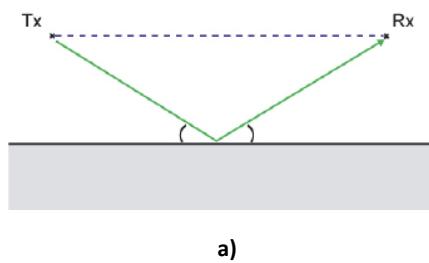
Si se quieren tener en cuenta múltiples obstáculos para el cálculo de la difracción existen métodos más complejos como los de Bullington o Deygout, [1].

#### 2.2.4 La reflexión

La onda electromagnética experimenta reflexiones al colisionar contra las diferentes estructuras que se encuentran a su paso. Dichas reflexiones se ven afectadas por el coeficiente de reflexión que depende de la frecuencia, la polarización, los materiales e incluso por el ángulo de incidencia. En la práctica para simular el efecto de las reflexiones podemos considerar dos comportamientos distintos en función del tipo de superficie:

Reflexión especular: es el resultado del choque contra obstáculos que son grandes en comparación con la longitud de onda, suelen ser paredes o superficies lisas. El comportamiento resultante sigue las leyes de la geometría, donde la dirección de salida del ángulo reflejado es igual que el del incidente, como muestra la figura 03 a), [1]:

Dispersión o scattering: en el mundo real casi ninguna superficie es completamente lisa. Lo que se encuentra la onda en el punto de incidencia son variaciones aleatorias de la superficie terrestre o estructuras artificiales que presentan patrones repetitivos o sistemáticos. En este caso la onda reflejada no sigue el comportamiento anterior sino que los rayos se reflejan en todas las direcciones, como indica la siguiente imagen b), [1]:



a)

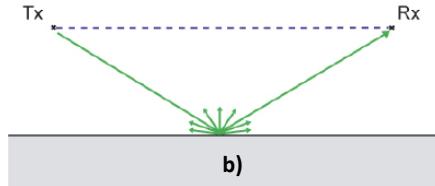


Figura 03. Diferentes comportamientos para la reflexión: a) especular o Lambertiana, b) dispersión o scattering, [1].

Es importante tener en cuenta estos dos de fenómenos que se acaban de comentar, la reflexión y la difracción, ya que son los más nocivos para la señal en cualquier comunicación móvil, y sobre todo si se trata de entornos urbanos.

### 2.3 Desvanecimientos de señal

Además de las pérdidas de propagación existen otros factores que influyen en la potencia total recibida. Elementos como edificios, tejados, árboles, en definitiva, el clutter en general, alteran el resultado de la transmisión mediante fluctuaciones temporales en la intensidad de la señal. Existen dos tipos de degradaciones diferenciadas por la repercusión que ejercen: desvanecimientos lentos (shadowing) y rápidos.

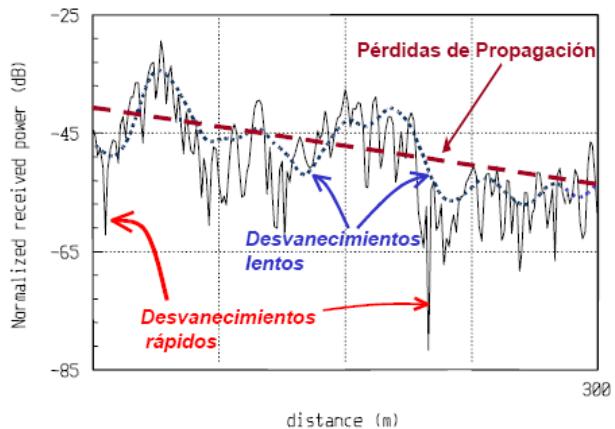


Figura 04. Efectos nocivos de la propagación en un entorno móvil, [3].

#### 2.3.1 Desvanecimientos lentos

Este tipo de degradación es producida por la variabilidad del entorno, y tiene como consecuencia un pequeño decaimiento en el nivel de la señal. Modelar el efecto provocado por todos los elementos de un lugar en particular es un hecho inviable, pero es necesario tenerlos en cuenta a la hora de caracterizar el comportamiento del canal. La caracterización de los desvanecimientos lentos puede hacerse ajustándose bien a medidas reales, considerando la potencia recibida como una variable aleatoria lognormal o normal en dB, cuya función de densidad de probabilidad es la que presenta la ecuación (5), [4]:

$$f_P(P) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(P-\bar{P})^2}{2\sigma^2}} [dB] \quad (5)$$

definiendo  $P$  como la potencia recibida,  $\bar{P}$ , potencia recibida media, y  $\sigma$  la desviación típica, función del entorno.

### 2.3.2 Desvanecimientos rápidos

Los desvanecimientos rápidos o de tipo Rayleigh en redes de banda ancha están provocados por la propagación multicamino. Esto significa la llegada a un mismo punto receptor de varios ecos de la señal producidos por las reflexiones sufridas en los elementos. Estas réplicas llegan en diferentes tiempos y con distintas amplitudes dependiendo de los caminos que hayan recorrido o la absorción que hayan sufrido, generando interferencias constructivas o destructivas. Su caracterización es mediante una estadística Rayleigh, [4], expresada por:

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad \text{con } r \geq 0 \quad (6)$$

con  $\sigma$  la desviación típica, función del entorno y  $r(t)$  la envolvente de la señal recibida.

El resultado del multicamino es un ensanchamiento temporal de la señal recibida como se refleja en la figura 05. Para caracterizar este fenómeno se utilizan los perfiles potencia – retardo o el llamado PDP, que dan una idea sobre la potencia media recibida por los diferentes caminos de propagación.

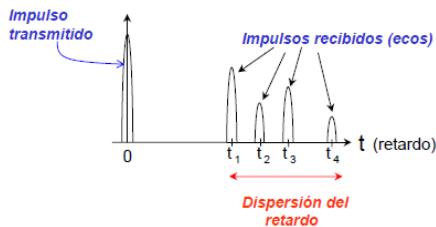


Figura 05. Efecto de dispersión del retardo,[3].

La siguiente imagen (figura 06) representa un perfil tipo PDP y la ecuación a la que responde es la mostrada en (7):

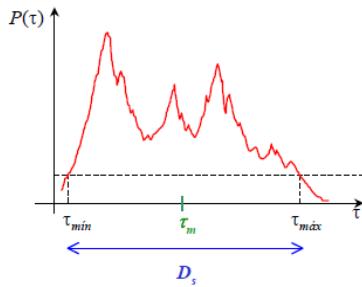


Figura 06. Perfil potencia retardo del canal de comunicaciones, [3].

$$P(\tau) = E\{|\hbar(\tau, t)|^2\} [dB] \quad (7)$$

El propósito final de la caracterización de este fenómeno es definir el parámetro delay spread (Ds) o dispersión del retardo, cuya interpretación visual se indica en la figura anterior. Da una idea de la desviación típica del PDP y está directamente relacionado con el ancho de banda en el cual la señal sufre distorsión. La expresión con la que se puede calcular su valor viene dada por (8), [4]:

$$D^2 = \frac{1}{P_m} \sum_{i=1}^M \tau_i^2 * P(\tau_i) - \left[ \frac{1}{P_m} * \sum_{i=1}^M \tau_i P(\tau_i) \right]^2 \quad (8)$$

con M el número total de muestras y  $P_m = \sum_i^n P(\tau_i)$ , (9), la potencia media y τ el retardo sufrido por la señal.

## 2.4 Modelos de propagación

Existen diferentes modelos de predicción de pérdidas, cuyo objetivo es estimar las pérdidas de propagación matemáticamente. Fundamentalmente se desarrollan dos tipos principales de modelos: los empíricos y los deterministas.

Los primeros están basados en medidas experimentales de donde se deducen las expresiones de los modelos. Tienen en cuenta parámetros de diseño como la distancia, la frecuencia o la altura de las antenas para sus estimaciones. Son sencillos de implementar, su coste computacional es reducido y son poco precisos, aunque históricamente son los que se han empleados para las planificaciones.

Los segundos tienen en cuenta las leyes de propagación de las ondas electromagnéticas para realizar los cálculos. Requieren gran cantidad de información y detalles sobre la geometría, localización y dimensiones de los edificios, además de características sobre el terreno en el que trabajan. Los resultados que se obtienen son de gran precisión, aunque llevan un coste computacional elevado.

Existen algunos modelos empíricos un poco más precisos, y que además son válidos para la banda frecuencial bajo estudio. De entre ellos se pueden destacar los modelos COST231 Walfisch – Ikegami (COST231 WI), [7], o el ECC-33 Model, [5], cuyas expresiones y características principales se comentan en el anexo correspondiente y se utilizarán para comparar con los obtenidos para Zaragoza en el capítulo de resultados. También se hará uso en dichas comparaciones de otros modelos como los desarrollados por la universidad de Standford (modelos SUI), [5], [6], extensiones del conocido modelo Okumura-Hata: COST 231 – Hata, [7], o sus equivalentes desarrollados por Ericsson: Ericsson Model 9999, [6]. Estos últimos están pensados para trabajar con bandas inferiores a 3.5 GHz pero su uso está ampliamente extendido, por lo que resulta interesante su comparación.

Estos estándares se basan en expresiones del tipo:  $L (dB) = f(d)$ , es decir, calculan las atenuaciones sufridas por la señal en función de la distancia. El modelo matemático más utilizado para ello surge tras aplicar el método de mínimo error cuadrático medio a la ecuación (2), y viene expresado por (10):

$$PL = L_o + 10\gamma \log_{10}(d/d_o) \quad [dB] \quad (10)$$

donde  $L_o$  es la atenuación para la distancia de referencia,  $d_o$ , considerada 100 m en este caso,  $L_o = 20 \log_{10}(4\pi d_o/\lambda) [dB]$ , (11),  $\gamma$  es el exponente o variación de las pérdidas de propagación con la distancia y  $\lambda$  es función de la frecuencia de trabajo, [5], [7]. Para determinar dicha función basta con tener caracterizados sus dos parámetros fundamentales,  $L_o$  y  $\gamma$ .

## Capítulo 3: HERRAMIENTA Y ENTORNO.

### 3.1 Introducción

La herramienta de trabajo utilizada para realizar las simulaciones, que son la base del presente proyecto, ha sido el programa ICS Telecom. Este software, de carácter profesional y desarrollado por la empresa ATDI, está especialmente diseñado para la planificación de redes radio. Su utilización se debe a su disponibilidad en el área de Teoría de la Señal y Comunicaciones, ya que ofrece la posibilidad de realizar los cálculos con modelos de terreno urbanos en 3D. Estos modelos se caracterizan por contener un alto nivel de información del terreno, cuestión que es relevante para nuestro estudio, por lo que nos ofrecerá unos resultados más realistas.

### 3.2 Características cartográficas del ICS

A la hora de trabajar con el programa ICS Telecom en el ámbito que nos ocupa en este proyecto, es decir, para realizar simulaciones en entornos urbanos y obtener unos resultados aproximados a la realidad, hay que tener en cuenta las siguientes cuestiones:

- El tipo de datos cartográficos sobre los que vamos a trabajar.
- El modelo de propagación.

#### 3.2.1 Datos cartográficos.

La elección del tipo y calidad de los datos cartográficos que vamos a utilizar es crítica para el desarrollo del proyecto, ya que nuestros resultados están altamente influenciados por las características del entorno. El programa nos ofrece la posibilidad de trabajar con este tipo de información en alta resolución, [1], [8]. Por ello se ha contado con las siguientes capas:

**Modelo digital de elevación del terreno** (archivos con extensión .GEO). Son modelos producidos a 1 metro de resolución que contienen la altura del terreno sobre el nivel del mar.

**Dos archivos de imágenes** (archivos .IMG y .PAL). El primero contiene una imagen aérea ortorrectificada del terreno a 1 metro de resolución. Y el segundo la información de colores, no es relevante en la obtención de los cálculos, pero sí facilita la localización visual.

**Archivo de clutter** (archivo .SOL). Aporta información sobre la ocupación del suelo, diferenciando entre la existencia de árboles, vegetación o edificios en cada punto concreto. Todos ellos están asociados a unos códigos, pudiendo el usuario elegir entre todos ellos.

**Capa de edificios** (archivos .BLG). Describe la información individual de cada edificio: su forma y su altura respecto al nivel del suelo con resolución de 1 metro.

Para generar unas simulaciones lo más aproximadas a la realidad posible y tener en cuenta los efectos más influyentes de la comunicación inalámbrica, el propio programa nos recomienda utilizar las capas mencionadas en formato de alta resolución. En la tabla siguiente se resumen los requerimientos mínimos y los efectos que permiten considerar:

DATOS EN ALTA RESOLUCIÓN	
<b>Contenidos Mínimos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· DTM (Digital Terrain Model) 2 metros mínimos de resolución.</li><li>· Archivos .BLG 2 metros mínimos de resolución.</li><li>· Archivos. SOL 2 metros mínimos de resolución.</li><li>· Ortofoto.</li></ul>
<b>Aplicaciones en el modelo de propagación</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Modelos deterministas.</li><li>· Trazado de rayos en 3D.</li></ul>
<b>Efectos considerados</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Nivel de señal recibido.</li><li>· Efecto cañón con interferencias constructivas y destructivas.</li><li>· Efecto de difusión.</li><li>· Efecto multicamino.</li><li>· Power Delay Profile.</li></ul>

Tabla 01. Características de alta resolución ICS Telecom, [1].

Teniendo esto en cuenta, la resolución de los archivos de datos cartográficos elegidos para las simulaciones en la ciudad de Zaragoza es de 1 metro de resolución. En la siguiente figura se aprecia la precisión que se consigue con estas capas y la imagen de la ciudad en 3D sobre la que se trabaja.

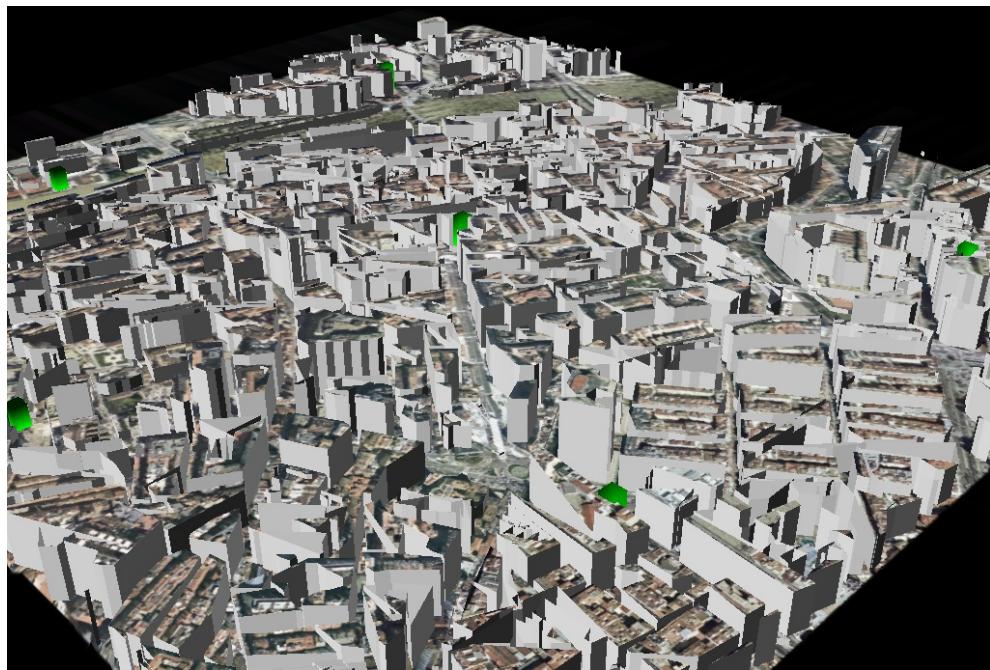


Figura 07. Imagen 3D del centro de Zaragoza.

### 3.2.2 Modelo de propagación.

Para elegir el modelo de propagación a utilizar en las simulaciones no hay que olvidar el tipo de tecnología que se quiere reproducir, ni el tipo de red que se va a implementar. En nuestro caso el objetivo final es una tecnología wireless para redes MAN. La importancia de esta elección radica, como en el caso anterior, en la influencia que ejercen tanto el entorno, como la ubicación y características de los equipos emisores y receptores.

En el cuadro siguiente se resumen las características del modelo de propagación con el que se realizan las simulaciones:

Característica	Modelo
<b>Modelo de propagación</b>	Método de Fresnel
<b>Difracción</b>	Deygout 94
<b>Atenuación subcamino</b>	Estándar Onda esférica
<b>Reflexiones</b>	Cobertura 3D Modelo Lambertiano
<b>PIRE antena</b>	Antena isotrópica

Tabla 02. Características del modelo de propagación utilizado en las simulaciones.

La ventaja que se obtiene al utilizar estas características de propagación viene dada principalmente por el uso del modelo en 3D y de onda esférica. Esto, junto con los datos cartográficos en alta resolución, permite tener en cuenta de forma más exacta los efectos de reflexión y difracción.

Otra de las consideraciones importantes del modelo de propagación, para este tipo de precisión cartográfica, es la incorporación en los cálculos del efecto de guiado o ‘efecto cañón’. Este fenómeno se produce cuando en determinadas zonas la estructura de las calles y edificios favorece la propagación de las ondas a larga distancia y con un alto nivel de potencia.

La imagen 08 refleja el resultado de una simulación real en el centro de Zaragoza donde se aprecia claramente el efecto de propagación experimentado en las avenidas principales:

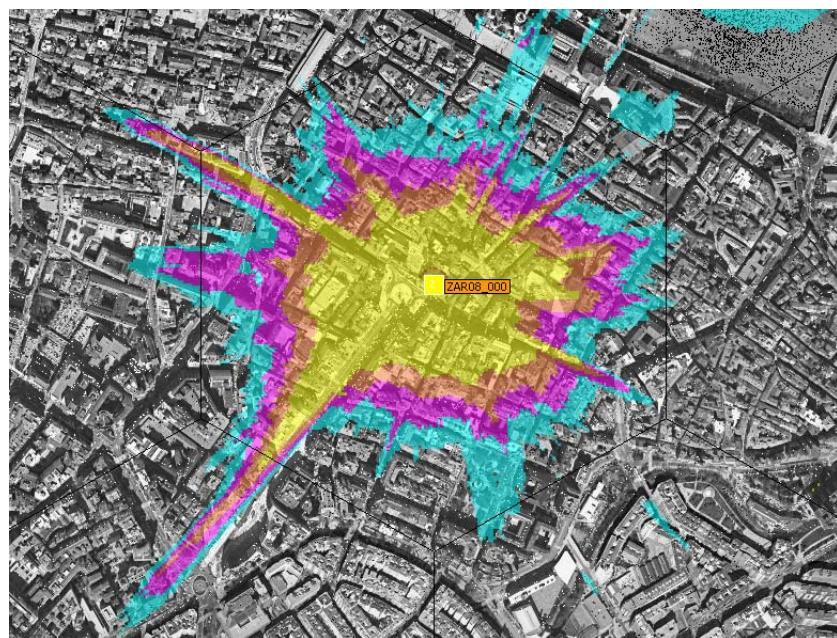


Figura 08. Mapa de cobertura con efecto cañón en el centro de Zaragoza.

### 3.3 Emplazamientos

Este proyecto estudia de forma particular las características de propagación en la ciudad de Zaragoza. El entorno real sobre el que se trabaja se presenta en la siguiente figura. Consiste en un mapa de la ciudad junto con una potencial ubicación de las estaciones base.

Como se observa en la siguiente imagen se ha dispuesto de una serie de estaciones base siguiendo una estructura de red celular tipo, con las cuales se ha pretendido cubrir toda la zona urbanizada de la ciudad. El radio de la célula es de 500 metros por ser un valor típico para entornos urbanos.

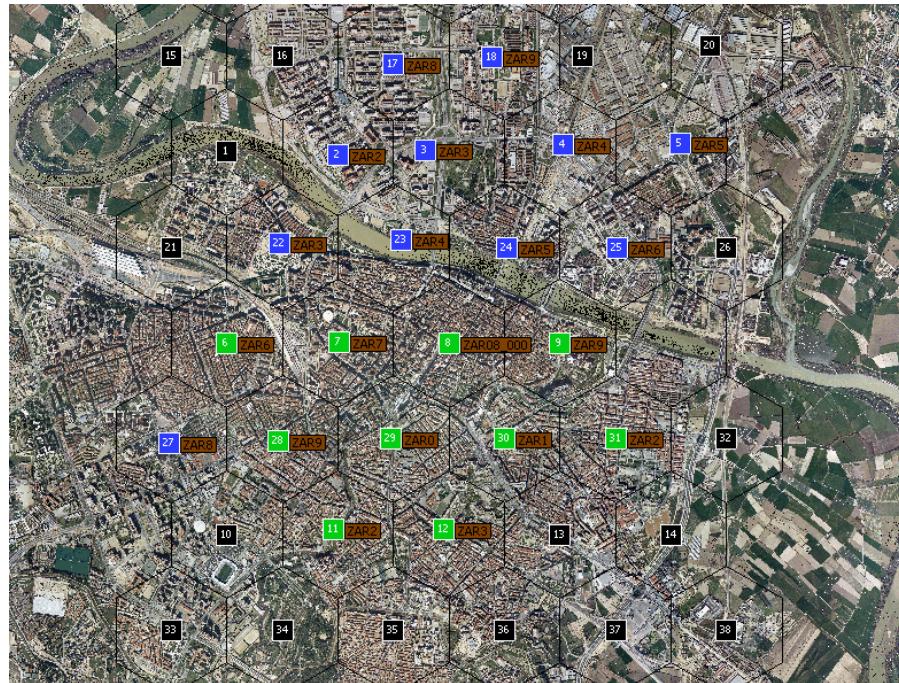


Figura 09. Entorno de trabajo, mapa de Zaragoza y estaciones base.

En general, los modelos de propagación existentes diferencian sus parámetros de diseño atendiendo a tres tipos de zonas distintas: urbana, suburbana y rural. De esta forma consiguen aproximarse más a las características del entorno bajo análisis.

Para realizar la división en Zaragoza se ha tenido en cuenta la densidad de usuarios [ $\text{us}/\text{km}^2$ ] presente en la ciudad. La situación resultante se observa en la figura anterior.

- ❖ Zona urbana: está formada por el centro y casco antiguo de Zaragoza. Las estaciones resaltadas en verde son las que dan cobertura a este tipo de terreno.
- ❖ Zona suburbana: la integran todos aquellos sectores de la ciudad urbanizados que limitan con el centro. Además de tener una densidad de población menor, la concentración de edificaciones también se reduce. La cobertura de esta zona está cubierta con los emplazamientos sombreados en azul.

El resto de estaciones que aparecen en el mapa inicial no se han tenido en cuenta por no considerarse representativas de ninguno de estos dos tipos de zonas.

### 3.4 Simulaciones

Como se comenta en la introducción, para la caracterización del canal propuesto en el proyecto se trabaja en dos vías diferentes. Éstas nos van a marcar los dos tipos de simulaciones a realizar con la herramienta de planificación. La primera de ellas tiene como objetivo determinar el modelo de pérdidas de propagación que se ajusta a la ciudad de Zaragoza, para ello se simularán los niveles de cobertura radiados por las estaciones base. Y la segunda, establecer un perfil de potencia – retardo (PDP), lo cual se realizará mediante simulaciones del multicamino.

### 3.4.1 Simulación de la cobertura

Como norma general, para poder dar unos resultados como válidos, es interesante contar con el mayor número de medidas posibles. Por esta razón, y aprovechando la capacidad del programa ICS Telecom para calcular el nivel de potencia recibido en cada punto del mapa, se simula la cobertura radiada por cada estación base.

Como se ha definido en el apartado anterior, el radio teórico de las células es de 500 m. Esto hace que se limite el cálculo de cobertura a todos los puntos que se encuentren a distancias inferiores a 1km del emisor, pues difícilmente habrá niveles de señal aceptables por encima de esta distancia en entornos urbanos, aunque sí es posible en entornos suburbanos. La figura 08 se muestra como ejemplo del resultado de una simulación de cobertura para una estación base urbana.

En la figura mencionada se observa como este cálculo no hace distinción entre medidas recibidas en el espacio libre o en el interior de edificios. Sin embargo el programa ofrece la posibilidad de filtrar el resultado y sacar la información por separado, el resultado se puede ver en la imagen 10. Se aprovechará esta situación para poder comparar las dos opciones y comprobar cómo incrementa la atenuación de la señal al penetrar en el interior edificios.

Para el resto de comparativas y resultados del proyecto se centrará la atención en las medidas correspondientes a situaciones outdoor, ya que para obtener una buena caracterización de medidas en interiores habría conocer de forma precisa datos específicos de los materiales y su atenuación.

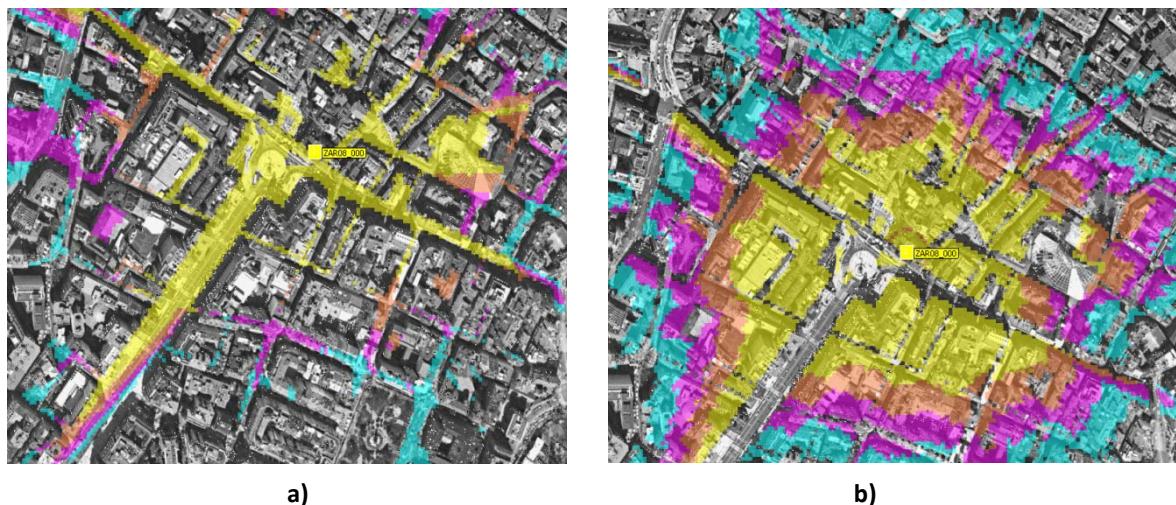


Figura 10. Mapas de cobertura urbana filtrados: a) pérdidas outdoor, b) pérdidas indoor.

### 3.4.2 Simulación del efecto multicamino

En el análisis del multicamino el programa calcula el número de rayos que llegan a un punto determinado del mapa. El resultado incluye el nivel de señal recibido en cada rayo y el tiempo de llegada (TOA), como muestra la figura 11:

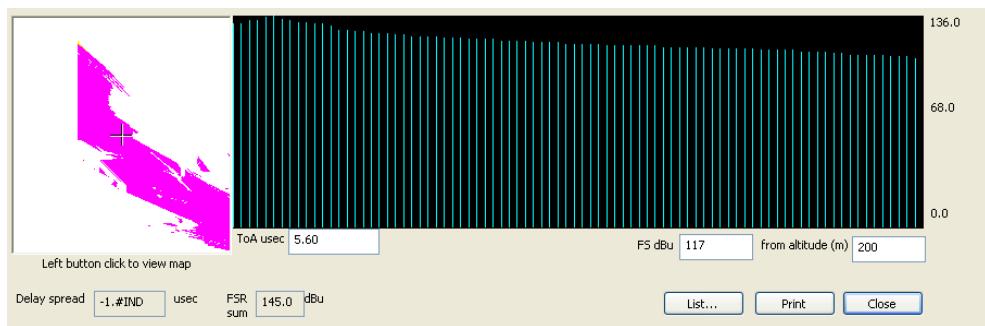


Figura 11. Resultado del análisis multicamino para un punto concreto del mapa.

Como en el caso anterior, para poder generalizar los resultados necesitamos contar con el mayor número de puntos posible. Para solventar este problema el programa permite realizar la simulación del multicamino sobre una base de datos de suscriptores reportando el cálculo sobre todos ellos, [9].

Las bases de datos que se han creado para cada estación base están formadas por 500 usuarios cada una. Los suscriptores se generan de forma aleatoria, pero teniendo en cuenta que permanecieran dentro del perímetro válido de cobertura y que estén ubicados fuera del clutter de edificios, quedando una situación como la de la siguiente imagen:

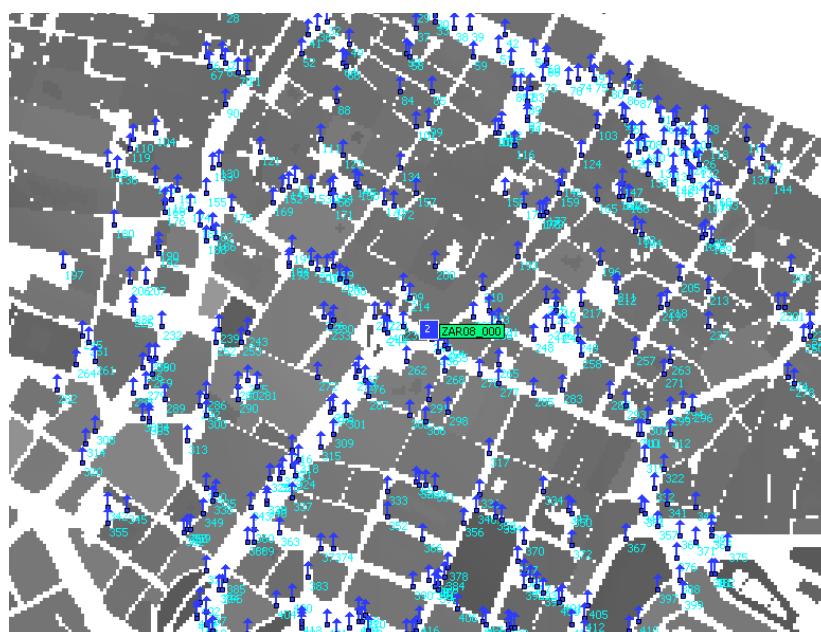


Figura 12. Ubicación de los suscriptores en el mapa.

## Capítulo 4: RESULTADOS

### 4.1 Introducción

Este capítulo se centra principalmente en el análisis de los resultados finales, como paso previo se describe de forma breve el proceso de trabajo seguido. Este proceso consiste en un tratamiento de los datos obtenidos de las simulaciones. Cabe destacar que este trabajo se realiza con el software matemático Matlab.

El método de trabajo ha sido similar para ambos tipos de simulaciones, tanto para el cálculo de coberturas como el de multicamino. Éstas se realizan de forma individual para cada estación base, y una vez analizados los comportamientos aislados, algunos de los cuales se muestran en el anexo II, se procede a la elaboración de un modelo único para cada tipo de entorno estudiado: el urbano y el suburbano. Esto se consigue con la unión de los resultados intermedios obtenidos para cada zona.

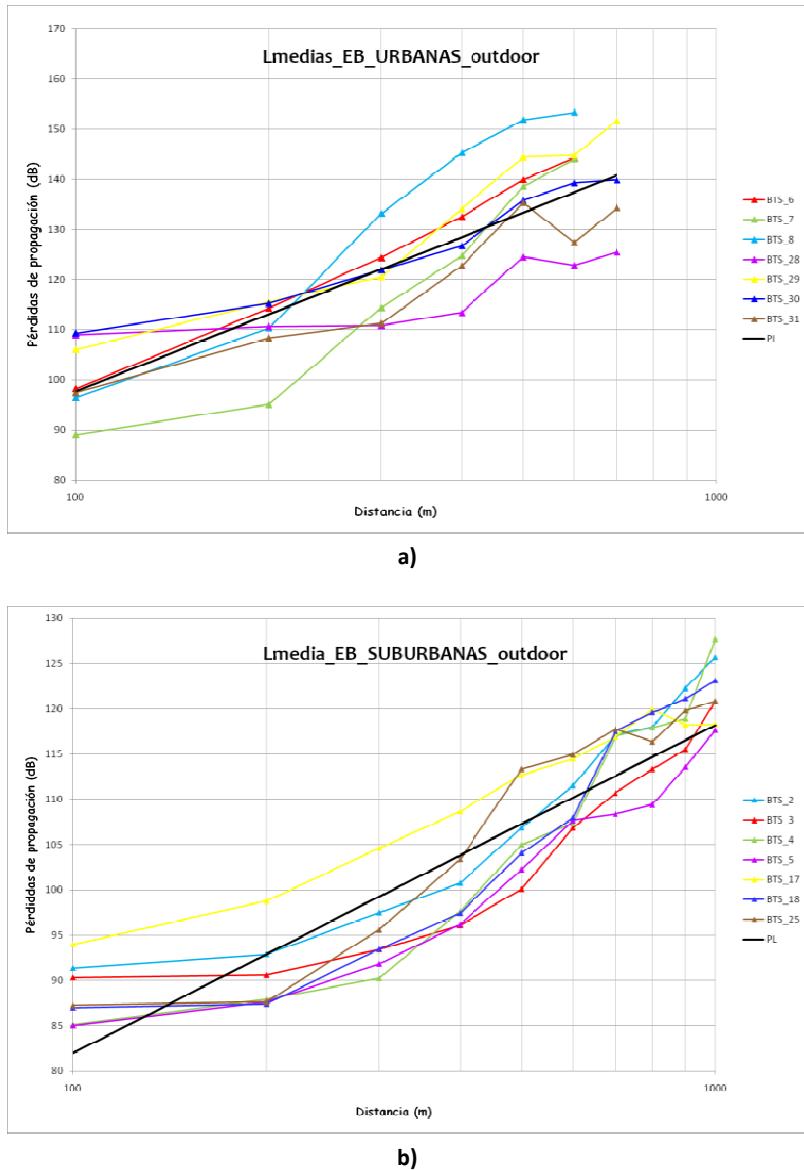
### 4.2 Caracterización de las pérdidas de propagación

#### 4.2.1 Resultados de las simulaciones

Los modelos de pérdidas de propagación se suelen caracterizar con 2 parámetros: la atenuación producida a una distancia de referencia,  $L_0$ , y el índice de variación de la potencia con la distancia,  $\gamma$ . Este es el objetivo que se persigue en este apartado.

Tras la simulación con ICS Telecom, el programa exporta un fichero de texto con los valores del nivel de potencia recibido en cada punto del mapa y una coordenada de referencia. El procesado consiste en relacionar estos niveles de potencia con la distancia a la que se han medido y calcular las pérdidas reales que sufre la señal en el recorrido. La fórmula utilizada para el cálculo es (2). Una vez obtenidos estos valores, dado el elevado número de muestras (resolución a 1m), se realiza un promediado de todas las existentes cada 100 m de distancia y para cada estación base. El resultado se presenta en las imágenes 13.a y 13.b. A este conjunto de puntos, correspondientes a las curvas de cada una de las estaciones base, se les aplica un método de regresión lineal, utilizando como variables la atenuación y la distancia, con el cual

se obtienen los parámetros que caracterizan la ecuación de la recta. En el anexo II se explica de forma más detallada este del proceso.



**Figura 13. Atenuaciones medias cada 100m para cada EB: a) Entorno suburbano b) Entorno urbano.**

En la figura a), correspondiente a estaciones base situadas en superficie urbana, el alcance máximo se encuentra entre 600 – 700m, a diferencia de las correspondientes a superficies suburbanas que pueden incluso superar el kilómetro. El motivo únicamente es debido a la influencia que ejerce el entorno en la propagación, como ya se ha comentado. La estructura de la zona más urbanizada de la ciudad, con una mayor densidad de población y edificios, calles más estrechas y mayor altura de todos los elementos, provocan atenuaciones mayores en la señal, por lo tanto un menor alcance. Esta situación induce unos comportamientos más dispares en la zona más urbanizada, generando una dispersión mayor. En la gráfica correspondiente, figura 13.a, se observa cómo cada emplazamiento tiene una conducta más particularizada que en el caso suburbano, figura 13.b.

En este tipo de simulaciones en particular, el programa tenía un nivel mínimo de recepción de señal (atenuación máxima), a partir del cual ya no se calculaban más valores, generando una saturación para todas las distancias, ahí es donde se ha establecido el límite del alcance. Aunque la estructura celular se diseña para que la radiación no supere el límite de la célula, el modelo de pérdidas que se va a considerar tendrá en cuenta los valores útiles hasta el alcance máximo permitido.

Por otro lado, el límite inferior se ha establecido en 100 m puesto que para distancias inferiores el comportamiento está influenciado por el diagrama de radiación de la antena introduciendo pérdidas adicionales por lo que no se consideran valores representativos.

#### 4.2.2 Modelos de propagación obtenidos

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para la caracterización de primer orden del canal móvil a 3.5 GHz en la ciudad de Zaragoza tanto para entornos urbanos como suburbanos.

Recordamos que el modelo de estimación de pérdidas de propagación que se quiere obtener es el reflejado en la ecuación (10), y que se representaba como:

$$PL = L_o + 10\gamma \log_{10}(d/d_o) \quad [dB] \quad (10)$$

Como se comenta en el punto anterior, se aplica un método de regresión lineal que minimiza el error cuadrático medio al conjunto de puntos reflejados en la figura 13, tras este proceso se obtienen los parámetros necesarios para caracterizar la expresión buscada. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para los dos entornos de estudio: urbanos y suburbanos. Los valores corresponden a las pérdidas calculadas para situaciones tanto interiores y exteriores como sólo exteriores (outdoor).

	SUBURBANAS OUTDOOR	SUBURBANAS	URBANAS OUTDOOR	URBANAS
$\gamma$	3.61	4.03	5.1	5.89
$L_o$	82.01	83.09	97.67	97.89
$\sigma$	4.75	4.38	11.01	8.89

Tabla 03. Parámetros de caracterización de primer orden del canal móvil para Zaragoza.

Como cabía esperar, las atenuaciones sufridas en zonas suburbanas son menores que en zonas urbanas. Este comportamiento se debe a las diferencias estructurales que hay entre ambos medios. En el primero los edificios suelen ser más bajos, con una densidad de edificación menor y una anchura de las calles mayor, lo que favorece la propagación en el espacio libre. Además, los efectos producidos por los elementos artificiales, como la reflexión o la difracción, tienen menor repercusión en la onda. Este hecho se comprueba en la tabla anterior a simple vista si nos fijamos como a la distancia de referencia la atenuación  $L_o$  se va incrementando, al igual que la pendiente o índice de variación con la distancia. Hay que destacar en ambos casos que la atenuación para medidas en exteriores es menor que en el caso conjunto. Este hecho se produce por el decaimiento de la señal al atravesar paredes y suelos de edificios.

En cuanto a la desviación típica se observa que hay un importante incremento en las zonas urbanas, esto puede ser producido por el efecto cañón. Este efecto de guiado de las calles hace que se reciban buenos niveles de señal a largas distancias, y a su vez, a la misma distancia en otras zonas la atenuación sea elevada. Esta situación provoca una alta variabilidad en los valores de atenuación, aumentando, como consecuencia, la desviación típica. En ambos tipos de superficie, este parámetro es mayor para exteriores. Existen varios motivos que influyen en este resultado, entre otros, se pueden destacar el menor número de puntos utilizados para procesar esos datos o la consideración de un índice de atenuación constante para caracterizar las pérdidas en el interior de edificios, lo que provoca que estas medidas varíen menos de lo que sucedería en una situación real.

La siguiente figura muestra de forma gráfica los modelos de propagación resultantes:

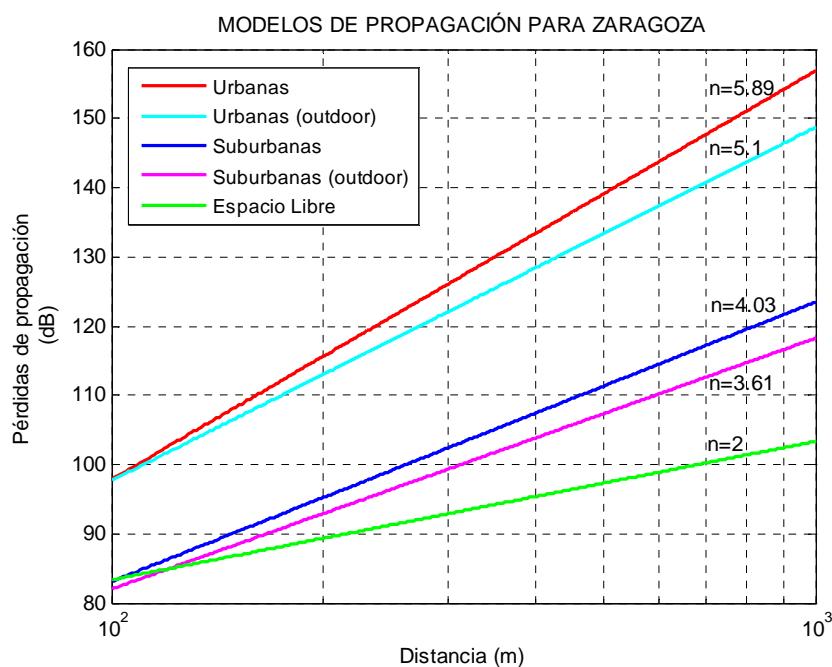


Figura 14. Modelos de pérdidas propagación obtenidos para Zaragoza.

#### 4.2.3 Comparativa con modelos existentes

Como se comenta el capítulo 2, existen diferentes modelos encargados de estimar las pérdidas de propagación. En este apartado se compararán dichos modelos y sus parámetros característicos con los obtenidos en las simulaciones para Zaragoza para observar las diferencias o similitudes con los resultados obtenidos.

En la literatura se encuentran algunas publicaciones que estudian el comportamiento de estos modelos a la frecuencia de trabajo del proyecto, aunque son muy limitadas y todavía no se ha demostrado completamente su validez. Los más habituales son modelos empíricos utilizados previamente para estimar pérdidas en sistemas como GSM y UMTS, donde se destacan: Stanford University Interim model (SUI) [5], [6], COST-231 Hata,[7], [7], y Ericsson model 9999,

[6]. Además, se tienen en cuenta otros modelos como ECC33 model, [5], o COST Walfisch-Ikegami model, [7], por ser más aproximados.

❖ Entornos urbanos:

La tabla 04 presenta de forma conjunta el valor de los parámetros principales para estos modelos y el equivalente para la ciudad de Zaragoza. Corresponden con medidas en entornos outdoor, urbanos y 2m para la altura del equipo receptor. En la imagen 15 se muestra la comparación de forma gráfica.

MODELO	$\gamma$	$L_o(100m)$	$\sigma$ (NLOS)
SUI	4.79	95.38	10.6
COST231 Hata	3.52	112.75	6.5
ECC 33	3.93	127.6	* <sup>1</sup>
ERICSSON 9999	3.03	103.14	8.8
COST231 WI	3.8	128	* <sup>1</sup>
Espacio Libre	2	83.32	-
<b>ICS Telecom - ZGZ</b>	<b>5.1</b>	<b>97.67</b>	<b>11.01</b>

Tabla 04. Comparación de modelos empíricos de caracterización de primer orden del canal con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos urbanos.

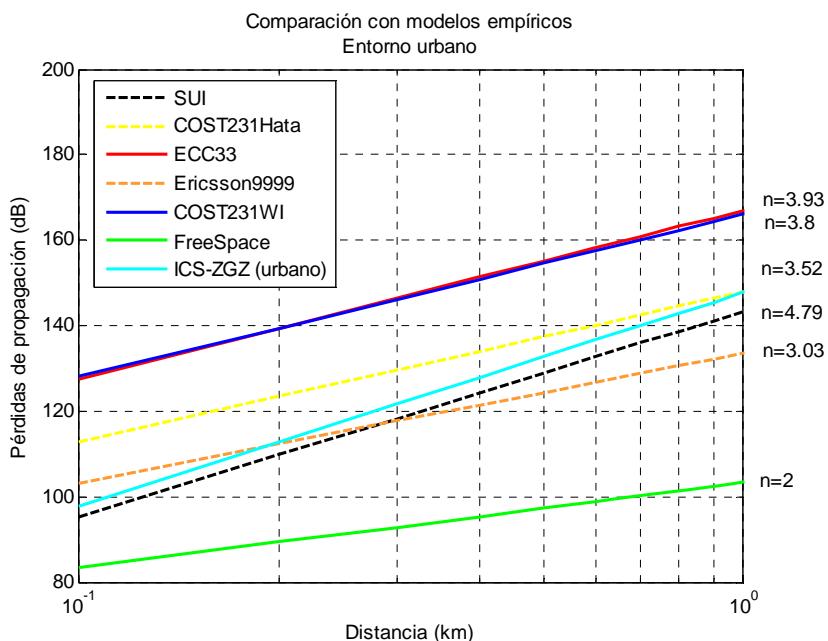


Figura 15. Comparación de modelos empíricos de caracterización de primer orden del canal con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos urbanos.

Se representan con línea discontinua aquellos modelos diseñados para frecuencias inferiores a 2GHz, por lo que no son del todo representativos para nuestro rango de análisis. Se observa que el comportamiento para la ciudad de Zaragoza presenta menos pérdidas respecto a los modelos COST231 WI y ECC 33, aunque tiene una pendiente mayor. En [6], explican que el valor típico de variación de la potencia con la distancia para entornos con estas características:

<sup>1</sup> Valor no disponible en la literatura.

urbanos, outdoor y NLOS está comprendido entre  $3 < \gamma < 5$ . Los resultados aquí expuestos están prácticamente en este rango de validez, sin olvidar que se trata de una simulación pudiendo variar en un caso real. En cuanto a las desviaciones típicas los valores cercanos a los 10 dB son habituales.

❖ Entornos suburbanos:

La tabla 05 contiene el valor de los métodos empíricos para entornos suburbanos. La mayor diferencia con el caso anterior se encuentra en la atenuación de referencia, la cual ha disminuido en la mayoría de los casos, como cabía esperar.

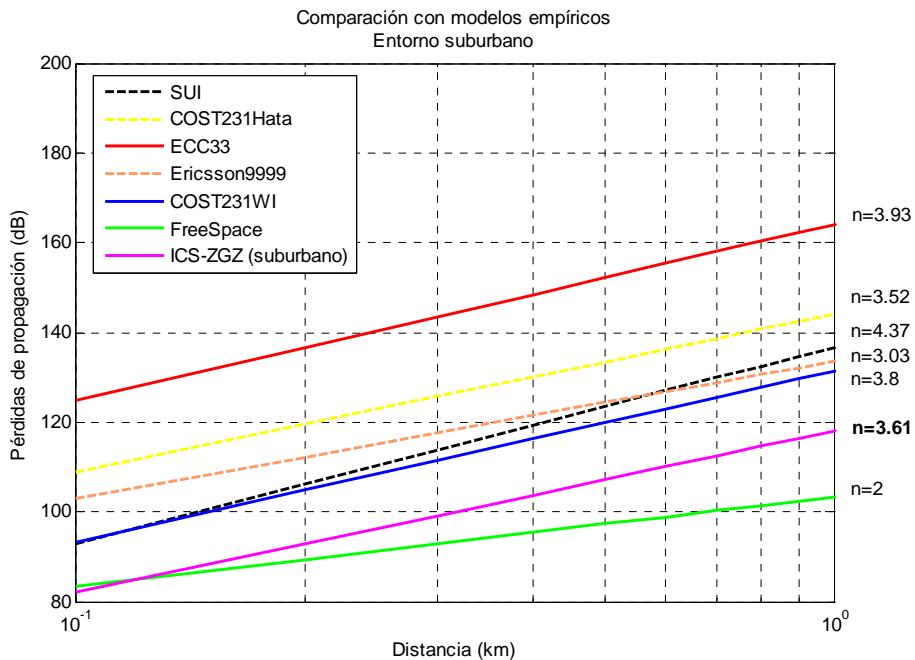
MODELO	$\gamma$	$L_o$ (100m)	$\sigma$ (NLOS)
SUI	4.37	92.98	8.2
COST231 Hata	3.52	108.8	* <sup>2</sup>
ECC 33	3.93	124.7	* <sup>2</sup>
ERICSSON 9999	3.03	103.14	* <sup>2</sup>
COST231 WI	3.8	93.36	* <sup>2</sup>
Espacio Libre	2	83.32	-
ICS Telecom - ZGZ	3.61	82.01	4.75

Tabla 05. Comparación de modelos empíricos de caracterización de primer orden del canal con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos suburbanos.

Si se comparan los parámetros características para Zaragoza con los del resto de modelos se observa que la pendiente se ajusta bastante a las estimaciones, mientras que la atenuación  $L_o$  se encuentra más cerca de los valores del espacio libre que los obtenidos en los modelos. Esto se debe a que los resultados están muy influenciados por los parámetros de referencia que se hayan considerado para caracterizar cada entorno, como por ejemplo la altura de las antenas emisoras, la altura de referencia de los edificios, las anchuras de las calles, o separación entre edificios. En la siguiente figura se representa la anterior comparación de forma gráfica:

---

<sup>2</sup> Valor no disponible en la literatura.



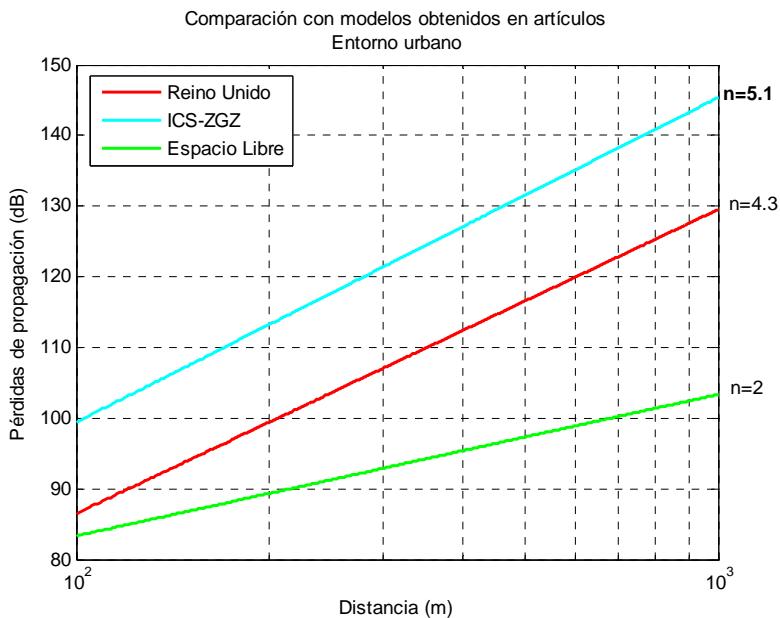
**Figura 16. Comparación de modelos empíricos de caracterización de primer orden del canal con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos suburbanos.**

#### 4.2.4 Comparativa con medidas reales

En estos últimos años ya se han realizado algunas pruebas reales con equipos trabajando a la frecuencia de 3.5GHz. Los resultados de estas medidas están reflejados en distintas publicaciones, de las cuales se han extraído los modelos propuestos en ellas para compararlos con los obtenidos en este proyecto para Zaragoza, a pesar de que los entornos son bastante diferentes, puesto que se trata de ciudades de otros países cuya similitud con Zaragoza es poca, pero es el material con el que se cuenta.

La mayoría de estudios se centran en entornos suburbanos, y los utilizados en la comparación corresponden a las siguientes poblaciones: Shanghai , [10], Ghent, [11] , y Roma, [12][12]. En cuanto a medidas en zonas urbanas el más representativo es [13], que refleja el resultado para las principales ciudades del Reino Unido: Londres, Birmingham, Liverpool y Manchester. Los resultados se muestran a continuación:

❖ Entornos urbanos:



**Figura 17. Comparación de modelos de caracterización de primer orden del canal correspondientes a ciudades del Reino Unido con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos urbanos.**

MODELO - CIUDAD	$\gamma$	$L_0$ (100m)	$\sigma$ (NLOS)
Reino Unido	4.3	92.98	7.5
Espacio Libre	2	83.32	-
ICS Telecom - ZGZ	5.1	97.67	11.01

**Tabla 06. Comparación de modelos de caracterización de primer orden del canal correspondientes a ciudades del Reino Unido con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos urbanos.**

El comportamiento en ambos medios es bastante similar, una elevada pendiente y con valores de atenuación muy por encima de los valores en espacio libre. Estos resultados son típicos para este tipo de medidas, pero las pérdidas para la ciudad de Zaragoza están en torno a unos 10 dB por encima de las del Reino Unido. Hay que recordar que éstas últimas corresponden a una media de varias ciudades, que no tienen porque parecerse a Zaragoza, las cuales han podido compensar sus comportamientos particulares. Por otro lado, la desviación típica para Zaragoza es algo mayor pero se encuentra entre los valores habituales.

❖ Entornos suburbanos:

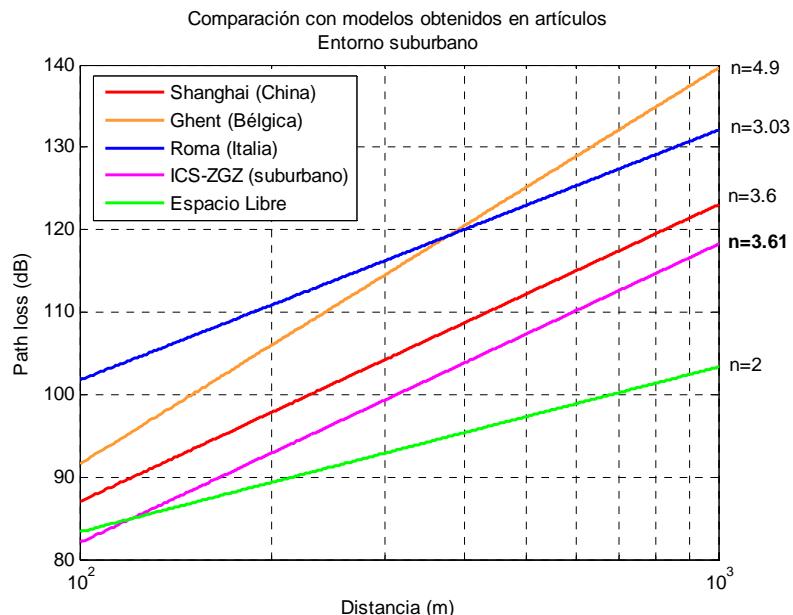


Figura 18. Comparación de modelos de caracterización de primer orden del canal correspondientes a diferentes ciudades con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos suburbanos.

MODELO - CIUDAD	$\gamma$	$L_0$ (100m)	$\sigma$ (NLOS)
Shanghai (China)	3.6	87.16	9.5
Ghent (Bélgica)	4.8	91.55	7.7
Roma (Italia)	3.03	101.7	7.5
Espacio Libre	2	82.01	-
ICS Telecom - ZGZ	3.61	97.67	4.75

Tabla 07. Comparación de modelos de caracterización de primer orden del canal correspondientes a diferentes ciudades con el modelo obtenido para Zaragoza en entornos suburbanos.

En el caso de zonas suburbanas los resultados se asemejan más entre ellos, a excepción del caso de Ghent. Las pendientes son bastantes inferiores al caso urbano, y los niveles de pérdidas se aproximan más a los del espacio libre, situación normal debido al tipo de entorno. En este caso la desviación típica correspondiente a Zaragoza es bastante inferior, lo que significa que la mayoría de los resultados están centrados en torno a los mismos niveles de señal, por lo que se puede afirmar que hay menor variabilidad del medio y el comportamiento del canal es bastante similar.

## 4.3 Caracterización del multicamino.

### 4.3.1 Resultados y procesado

El resultado de las simulaciones del multicamino es un fichero de tipo excell que contiene el número de rayos recibidos por cada usuario, junto con su nivel de señal y el tiempo de llegada (TOA) al receptor.

El tratamiento de esta información consiste en independizar la potencia recibida de la distancia, la cual viene determinada por la posición del suscriptor, y asociar los niveles de señal recibidos a cada retardo. El algoritmo que implementa este proceso ofrece como resultado el perfil potencia retardo buscado, es decir, el PDP. Como consecuencia de esta función surge el parámetro delay spread,  $D_s$ , que es una medida de la desviación típica de este perfil y es el parámetro que refleja la distorsión real del canal. El diagrama del anexo II, (figura 33), resume este proceso.

### 4.3.2 Perfiles potencia – retardo, PDP

En este apartado se muestran los perfiles potencia retardo (PDP) resultantes de las simulaciones para la ciudad de Zaragoza a 3.5 GHz.

Los resultados corresponden a 4500 puntos de medidas en entornos urbanos y 5000 Para entornos suburbanos. Los datos obtenidos tienen una resolución de decena de microsegundo para los tiempos de llegada de cada rayo. Se descartan valores con amplitudes a partir de 10 dB por debajo del nivel máximo, por considerarse niveles despreciables frente al resto.

A continuación se muestran gráficamente los resultados de estos perfiles. Su significado es representar el nivel de potencia medio que recibe el receptor asociado a cada camino de propagación, los cuales vienen identificados por medio del retardo, es decir, el tiempo que le cuesta viajar a la onda.

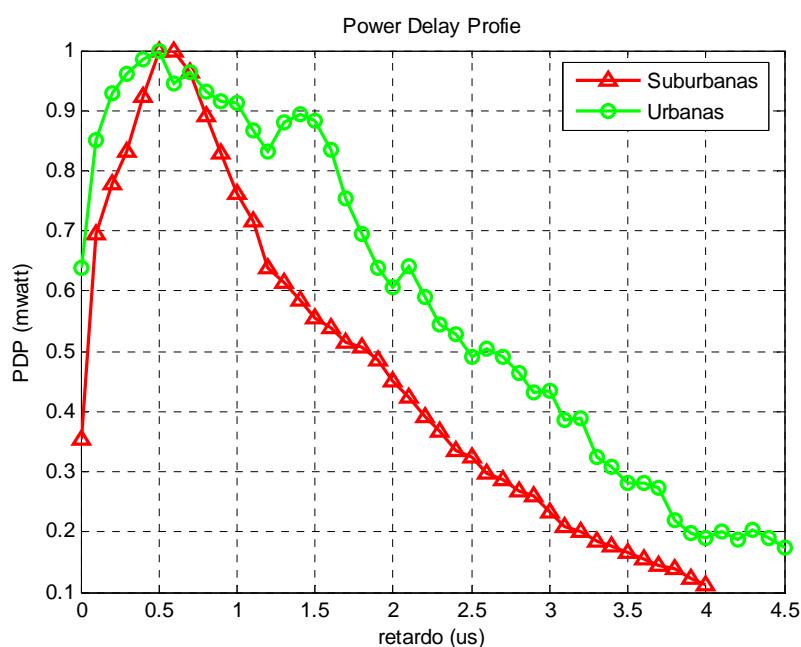


Figura 19. Perfil potencia retardo de la ciudad de Zaragoza para entornos urbanos

❖ Entornos urbanos:

El PDP resultante refleja que durante 4.5  $\mu\text{s}$  estamos recibiendo ecos de la misma señal. El nivel máximo se recibe transcurridos 0.5  $\mu\text{s}$ , es decir, no corresponde al rayo directo. Se puede observar también como en el instante 1.5  $\mu\text{s}$  aproximadamente se recibirán de nuevo rayos con elevada potencia, lo que provoca un ensanchamiento de esta función y supone una dispersión temporal mayor. A partir de este instante los niveles de señal van decayendo prácticamente de forma lineal.

❖ Entornos suburbanos:

El perfil correspondiente a entornos suburbanos muestra que los niveles de potencia más significativos se reciben en torno a los mismos instantes temporales, centrados en 0.5  $\mu\text{s}$ , pero quizás con un poco más de retardo que los urbanos.

En ambas situaciones el comportamiento es semejante en cuanto al instante de recepción del máximo nivel de señal, es decir, no se recibe en el instante temporal 0, sino que lo hace transcurrido medio microsegundo. Esto indica que el rayo directo se atenúa de forma considerable al atravesar los obstáculos que se encuentren en el camino, y por tanto, se puede conseguir una ventaja de las reflexiones que sufre la transmisión.

#### 4.3.3 Ensanchamiento temporal, Ds

A raíz de las funciones anteriores para el PDP podemos caracterizar el parámetro delay spread, es decir, el ensanchamiento temporal máximo que sufre la señal. En la siguiente tabla se muestra el valor eficaz de dicho parámetro para ambos medios:

ENTORNO	Ds
Suburbano	1.085 $\mu\text{s}$
Urbano	1.208 $\mu\text{s}$

Tabla 08: Valores del ensanchamiento temporal para Zaragoza en entornos urbanos y suburbanos.

Como se observa en la tabla el ensanchamiento del retardo para superficies urbanas es mayor que para suburbanas. Esto se debe al mayor número de reflexiones que sufre la señal por la mayor concentración de obstáculos y superficies reflectantes. Los valores son bastante razonables, ya que para este tipo de entornos suelen resultar del orden del microsegundo. La importancia de este parámetro se encuentra en la relación que mantiene con el ancho de banda de coherencia del sistema.

## Capítulo 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

El objetivo principal que se pretende en este proyecto es caracterizar el canal móvil en la banda frecuencial de 3.5 GHz para la ciudad de Zaragoza mediante una serie de simulaciones realizadas con una herramienta de planificación radioeléctrica. Dicha caracterización consiste en determinar los parámetros necesarios para establecer un modelo del primer orden del canal, cuyo fin es estimar las pérdidas de propagación producidas durante el recorrido de la señal. Además, se añade a esta propuesta la obtención de los parámetros fundamentales para la caracterización estadística.

En el capítulo anterior se presentan los resultados conseguidos para cumplir dicho objetivo, además de compararlos con otros estudios similares presentes en la bibliografía, como estaba previsto.

Los modelos de propagación calculados, tanto para entornos urbanos como suburbanos, son útiles de cara a estimar el comportamiento del medio desde el punto de vista de pérdidas de la señal en la banda de 3.5 GHz. Los resultados se han obtenido de forma particular para la ciudad de Zaragoza, sin embargo se pueden extender a otras ciudades con características similares de las cuales no se disponga del modelo en 3D de la ciudad.

En cuanto a los resultados numéricos del proyecto hay que decir que los valores son bastante realistas y reflejan fielmente los comportamientos estudiados, es decir, las atenuaciones son mayores en zonas urbanas que en suburbanas, en las cuales el alcance es mayor. Se mantiene en ambos entornos la disminución de atenuaciones en el espacio libre, como es lógico, y el efecto multicamino afecta de forma más intensa a las zonas más urbanizadas de la ciudad.

No hay que olvidar que estos resultados se han obtenido en base a simulaciones, lo que significa que son estimaciones del comportamiento y no valores medidos en entornos reales. Aunque se han comparado con diferentes estudios de la bibliografía y los valores se ajustan de forma bastante razonable a las pocas medidas reales existentes y a los modelos teóricos más utilizados.

Otra de las conclusiones extraídas, aunque ya es conocida por la teoría electromagnética, es la elevada influencia que ejercen todos los elementos que intervienen en la comunicación. Por un lado, se encuentran los parámetros de diseño, como son las alturas de las antenas, tanto de emisores como de receptores, la frecuencia de trabajo, el diagrama de radiación, la potencia de emisión, en definitiva, cualquiera de los parámetros variables de un sistema de comunicaciones. Y por otro lado, la influencia de los elementos que rodean esta comunicación, bien sean edificios, vegetación, materiales, o estructuras de calles. Todos ellos provocan efectos nocivos en la señal y suponen una verdadera dificultad ya que no se pueden controlar. Para paliar este inconveniente contamos con modelos más o menos complejos que intentan incorporar estos efectos, pero nunca reflejan un comportamiento exacto. De ahí se deduce la importancia que tiene disponer de unos datos cartográficos de alta calidad, como ha sido nuestro caso, para obtener resultados los más realistas posibles.

El trabajo personal realizado para la ejecución de este proyecto ha sido caracterizar el canal móvil en el entorno correspondiente a la ciudad de Zaragoza empleando la herramienta de planificación de redes ICS Telecom, lo que ha requerido un manejo y aprendizaje de la misma. Esta herramienta ha proporcionado una serie de datos, los cuales han necesitado de un procesado conveniente para obtener la caracterización pretendida. Además, para orientar de forma adecuada el trabajo se han realizado diferentes búsquedas bibliográficas, con las cuales se han complementado los resultados finales.

## 5.2 Líneas futuras

La primera tarea a realizar, si fuera posible, sería efectuar medidas reales en el mismo entorno para comprobar la fidelidad de los modelos y poder ajustarlos mediante parámetros correctores. Para ello sería imprescindible disponer los equipos pertinentes y de una cierta infraestructura, aspectos de los que no se dispone a día de hoy. En este caso también se podrían efectuar medidas en entornos similares a la ciudad de Zaragoza para corroborar su utilidad o incluso realizar nuevas simulaciones si se dispusiera de su modelo 3D.

Otro de los aspectos interesantes en los que se podría trabajar sería completar la caracterización, bien incorporando los resultados en situaciones indoor o mediante el estudio de otros parámetros del modelado de segundo orden con el fin de profundizar más en el comportamiento del canal.

Como última propuesta, y aprovechando los resultados existentes, se podrían realizar comparativas variando parámetros de diseño, por ejemplo las alturas de las antenas o las frecuencias centrales de trabajo, para poder extender los resultados a un mayor número de situaciones.

## Referencias y bibliografía

- [1] ICS Telecom White Paper. “*Planning a WIMAX network with ICS telecom nG*”. Diciembre 2004. Disponible en [www.atdi.com](http://www.atdi.com).
- [2] ICS Telecom White Paper. “*Signal propagation modeling in urban environment*”. Junio 2005. Disponible en [www.atdi.com](http://www.atdi.com).
- [3] Fernando Gutiérrez Soler, “*Radiocomunicaciones*”. Apuntes de la asignatura de de cuarto curso de Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad de Zaragoza.
- [4] Hernando Rábanos, J.M. “*Transmisión por ondas radio*”. Editorial Universitaria Ramón Areces S.A.
- [5] V.S. Abhayawardhana, I.J. Wassell, D. Crosby, M.P. Sellars, M.G. Brown, “*Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access System*”, en IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2006, pp 978 – 983.
- [6] J. Milanovic, S. Rimac-Drlje, y K. Bejuk, “*Comparison of Propagation Models Accuracy for WIMAX on 3.5 GHz*”, en IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2007, pp 111-114.
- [7] Amarasinghe K.C., Peiris K.G.A.B, Thelisinghe L.A.D.M.D, Warnakulasuriya G.M., and Samarasinghe A.T.L.K., “*Comparison of Propagation Models for Fixes WIMAX System base on IEEE 802.16-2004*”, en IEEE Fourth International conference on Industrial and Information Systems, Diciembre del 2009.
- [8] ICS Telecom White Paper. “*Designing/Optimizing WIMAX networks: a quick-guide with ICS Telecom*”. Disponible en [www.atdi.com](http://www.atdi.com).
- [9] ICS Telecom White Paper. “*Multipath in ICS Telecom*”, Enero 2005, Disponible en [www.atdi.com](http://www.atdi.com).
- [10] Sun Kun, Wang Ping, Li Yingze, “*Path Loss Models for Suburban Scenario at 2.3 GHz, 2.6 GHz y 3.5 GHz*”, en IEEE National 863 High Technology Research and Development Program of China, Marzo 2008.
- [11] Wout Joseph, Laurens Roelens y Luc Martens, “*Path Loss Model for Wireless Applications at 3500 MHz*”, en Departamento de Información y Tecnología de Universidad de Ghent.
- [12] De Luca, D. et al. “*Outdoor Path Loss Models for IEEE 802.16 in Suburban and Campus like Environment*”, en Proceedings of the ICC, 2007, pp 4902 – 4906.
- [13] Marcus C., Walden, Frank j. Roswell, “*Urban Propagation Measurements and Statistical Path Loss Model at 3.5 GHz*”.

## Glosario

<b>BS</b>	Base station
<b>Ds</b>	Delay spread
<b>FWA</b>	Fixed Wireless Access
<b>GSM</b>	Groupe Special Mobile
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronic Engineers
<b>LOS</b>	Line of Sight
<b>MAN</b>	Metropolitan Area Network
<b>NLOS</b>	Non Line of Sight
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>PDP</b>	Power Delay Profile
<b>PL</b>	Path Loss
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>SUI</b>	Stanford University Interim
<b>TOA</b>	Time of Arrival
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications SysteM
<b>WIMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network