



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Modelos de propagación para comunicaciones móviles 4G y 5G

AUTOR: Francisco Javier García Rueda

TUTOR (o Director en su caso): Rafael Herradón Díez

TITULACIÓN: Sistemas de Telecomunicación

DEPARTAMENTO: Teoría de la Señal y Comunicaciones

VºBº

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Gerardo Pérez Villalón

VOCAL: Rafael Herradón Díez

SECRETARIO: Pedro García del Pino

Fecha de lectura: de julio de 2016

Calificación:

El Secretario,

Resumen

Este trabajo trata de dar una visión global sobre los distintos modelos de propagación existentes hoy en día para las comunicaciones móviles 4G y sobre los propuestos para la futura generación 5G. Con este propósito, analizaremos la evolución de las comunicaciones móviles y de los modelos de propagación a lo largo de la historia hasta llegar a la actualidad, y estableceremos una clasificación de los distintos modelos atendiendo a tres características propias de los mismos. Una vez clasificados los modelos de predicción, estaremos en disposición de aplicarlos a los estándares que se utilizan en la actualidad como LTE (Long Term Evolution) y LTE-Advanced, que pertenecen a la cuarta generación de tecnologías móviles o 4G. Después de estudiar su aplicación en 4G, nos apoyaremos en los resultados de los proyectos que a día de hoy se encuentran en fase de investigación de la nueva generación 5G, para definir algunos aspectos que deberá cubrir el nuevo modelo de canal, así como los modelos de propagación más adecuados para trabajar con los nuevos requisitos. Para llevar a cabo esta tarea tanto en 4G como en 5G nos valdremos de estudios comparativos, simulaciones y ejemplos en escenarios reales.

Abstract

The purpose of this paper is to give an overview of the different radio propagation models existing today for the 4G mobile telecommunications and those proposed for the next 5G generation. With this intention, we will analyze the evolution of both, mobile communications and radio propagation models, throughout history up to the present, and we will classify the radio propagation models into three groups according to three of their characteristics. Once we reach to this point, we will be able to apply them to the standards used today as LTE and LTE-Advanced, that belongs to the fourth generation of mobile telecommunications technology (4G). After studying its application in this technology, we will rely on the results of the projects which are researching next generation of mobile technologies to define some aspects that should cover the new channel model, and also the new propagation models more indicated to work with the new requirements. To carry out this task both 4G and 5G we will use comparative studies, simulations and examples in real scenarios.

Contenido

1.	Introducción	1
2.	Comunicaciones móviles y modelos de propagación.....	3
2.1.	Definición de modelo de propagación	3
2.2.	Historia y evolución de las comunicaciones móviles.....	4
2.2.1.	Precedentes	4
2.2.2.	Primera generación	5
2.2.3.	Segunda generación	5
2.2.4.	Tercera generación.....	6
2.2.5.	Cuarta generación	6
2.2.6.	Quinta generación	7
2.3.	Historia y evolución de los modelos de propagación.....	7
2.3.1.	Principios básicos de cálculo de coberturas	8
2.3.2.	Sistemas clásicos.....	8
2.3.3.	Sistemas informatizados.....	9
3.	Clasificación de los modelos de propagación.....	13
3.1.	Introducción a la clasificación	13
3.2.	Clasificación según el ambiente de propagación	14
3.2.1.	Interiores	14
3.2.2.	Exteriores.....	18
3.3.	Clasificación según el área de cobertura.....	29
3.3.1.	Células globales	30
3.3.2.	Hipercélulas	31
3.3.3.	Macro células.....	33
3.3.4.	Micro células.....	34
3.3.5.	Pico células	36
3.3.6.	Femto células.....	37
3.4.	Clasificación según el origen de los datos	38
3.4.1.	Modelos empíricos	39
3.4.2.	Modelos deterministas.....	42
3.4.3.	Modelos semi-empíricos	43
4.	Modelos de propagación para comunicaciones móviles 4G.....	45
4.1.	Introducción	45
4.2.	Conceptos básicos sobre LTE.....	45
4.2.1.	Parámetros radio de LTE.....	48

4.2.2.	Escenarios MIMO.....	49
4.3.	Modelo de canal LTE.....	50
4.3.1.	Modelado mediante etapas de retardo	50
4.3.2.	Modelo de canal 3D.....	51
4.4.	Modelos utilizados en LTE	54
4.4.1.	Comparación de modelos.....	55
4.4.2.	Conclusiones.....	58
4.5.	Conceptos básicos sobre LTE-Advanced.....	58
4.5.1.	Agregación de portadoras (Carrier aggregation)	59
4.5.2.	Multiplexado espacial (MIMO).....	60
4.5.3.	Nodos de repetición regenerativa (Relay Nodes)	60
4.5.4.	Parámetros radio de LTE-A.....	61
4.6.	Estudio comparativo de modelos de propagación para LTE-A.....	62
4.6.1.	Modelos utilizados en LTE-Advanced	62
4.6.2.	Comparación de modelos.....	64
4.6.3.	Ejemplo de simulación de red LTE-A	66
5.	Propuestas de modelos de propagación para comunicaciones móviles 5G	69
5.1.	Introducción al 5G	69
5.1.1.	Casos de uso de la visión del 5G.....	69
5.1.2.	Requisitos de 5G.....	69
5.1.3.	Tecnología y arquitectura de 5G	71
5.1.4.	Fechas de despliegue previstas	73
5.2.	Bandas de frecuencia candidatas para 5G	73
5.2.1.	Escenarios posibles y factores limitantes	74
5.2.2.	Rangos de frecuencia considerados	77
5.2.3.	Bandas prioritarias.....	78
5.3.	Modelos de canal 5G	79
5.3.1.	Requerimientos del nuevo modelo de canal.....	80
5.3.2.	Modelos de canal disponibles	81
5.3.3.	Modelos de propagación propuestos para 5G	84
5.3.4.	Ejemplo de análisis y medidas en 5G en escenarios reales.....	87
6.	Conclusiones y trabajos futuros	89
7.	Referencias (Norma ISO 690:2010(E)).....	90

Lista de Figuras

Figura 2.1: Evolución del número de líneas de telefonía móvil en España en el periodo de 2000 a 2013 (millones de líneas)	4
Figura 2.2: Evolución del número de usuarios de telefonía móvil según el estándar que usan.....	5
Figura 2.3: Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles	7
Figura 2.4. Interpretación física del modelo de Allsebrook-Parsons (izquierda) y del modelo de Ikegami-Ioshida	10
Figura 2.5: Ejemplo de cálculo de radioenlace con Radio Mobile (izquierda) y planificación de red LTE con Planet (derecha).....	12
Figura 3.1: Clasificación de los modelos de propagación	14
Figura 3.2: Predicción en edificio de oficinas con múltiples plantas (izquierda). Escenario de propagación interior multirrayo (derecha)	15
Figura 3.3: Comparación de los modelos de propagación para interiores	18
Figura 3.4: Predicción de la señal del satélite basada en un mapa del tipo de terreno	19
Figura 3.5: Proceso de simulación del modelo para satélite en áreas urbanas.....	20
Figura 3.6: Perfil de terreno con los parámetros de Okumura-Hata	22
Figura 3.7: Curvas de la recomendación ITU-R P.1546-4 (f=2 GHz)	23
Figura 3.8: Ejemplo de predicción con el modelo determinista de 2 rayos.....	24
Figura 3.9: Comparación de modelos de predicción rurales	24
Figura 3.10: Ejemplos de aplicación del modelo Longley-Rice (2D a la izquierda y 3D a la derecha)	25
Figura 3.11: Datos vectoriales de Mónaco incluyendo la topografía.....	26
Figura 3.12: Comparación de los modelos de propagación urbanos.....	27
Figura 3.13: Comportamiento Scattering medido en la superficie de una carretera	28
Figura 3.14: Desplazamiento Doppler procesado	29
Figura 3.15: Clasificación según el área de cobertura.....	30
Figura 3.16: Escenario de propagación del modelo COST 231 W-I.....	34
Figura 3.17: Femtocélulas	38
Figura 3.18: Clasificación de los modelos según el origen de los datos.....	39
Figura 3.19: Modelo de dos rayos.....	43
Figura 3.20: Modelo COST 231-Walfisch-Ikegami.....	44
Figura 4.1: Integrantes del 3GPP	45
Figura 4.2: Soluciones de red desde GSM (2G) a LTE (4G).....	46
Figura 4.3: Interfaces S1 y X2	47

Figura 4.4: OFDMA y SC-FDMA.....	48
Figura 4.5: MBMS (izquierda) y HeNB (derecha).....	48
Figura 4.6: Configuración del ancho de banda de portadora E-UTRA.....	49
Figura 4.7: Probabilidades LOS tipo 1 y tipo 2.....	52
Figura 4.8: Escenario 3D-UMa (izquierda) y 3D-UMi (derecha)	53
Figura 4.9: Definiciones de distancias para exteriores e interiores	53
Figura 4.10: Pasos para la generación del canal en el modelo de canal 3D del 3GPP	54
Figura 4.11: Resultado del modelo SUI	56
Figura 4.12: Resultado del modelo Okumura.....	56
Figura 4.13: Resultado del modelo COST 231 Hata.....	57
Figura 4.14: Resultado del modelo COST 231 W-I.....	57
Figura 4.15: Resultado del modelo Ericsson 9999.....	57
Figura 4.16: Tipos de configuraciones en agregación de portadoras.....	59
Figura 4.17: Ejemplo de CA del tipo Inter-band non-contiguous.....	60
Figura 4.18: Relay Nodes	61
Figura 4.19: Esquemas de acceso: enlace descendente (izquierda) y enlace ascendente (derecha)	61
Figura 4.20: Modelo JTG5-6 entre 100 y 1000 m	63
Figura 4.21: Comparación de los modelos en el medio rural.....	65
Figura 4.22: Comparación de los modelos en el medio urbano.....	65
Figura 4.23: Comparación de los modelos en el medio suburbano	66
Figura 4.24: Cobertura del modelo Hata COST 231 (izquierda) y del modelo Urban 3GPP LTE (derecha)	67
Figura 4.25: Cobertura del modelo ITU-R 525 + Deygout 94 + Fine Integration (izquierda) y del ITU- R 525 + Deygout 66 + Deygout 66 (derecha).....	67
Figura 5.1: Arquitectura 5G	72
Figura 5.2: Slices 5G en una misma infraestructura.....	73
Figura 5.3: Escenarios y casos de uso propuestos por el METIS	74
Figura 5.4: UMi Street Canyon (izquierda) UMi Open Square (derecha)	75
Figura 5.5: Típico interior de oficina (izquierda) y centro comercial (derecha)	75
Figura 5.6: Montaje sobre azotea en escenario UMa	76
Figura 5.7: Atenuación específica por lluvia (izquierda) y por gases (derecha)	77
Figura 5.8: Modelo de propagación para Nueva York en 28 GHz	88

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Comparación de modelos según la pendiente de pérdidas	11
Tabla 3.1: Parámetros por categoría de terreno del modelo SUI	32
Tabla 3.2: Valores por defecto de los parámetros del modelo Ericsson 9999.....	32
Tabla 3.3: Resultados numéricos del ejemplo	33
Tabla 3.4: Modelo de Ericsson Indoor.....	37
Tabla 4.1: Parámetros radio de LTE	49
Tabla 4.2: Modelo de canal mediante etapas de retardo	50
Tabla 4.3: Modelos de pérdidas del camino	53
Tabla 4.4: Bandas de frecuencia LTE en España.....	55
Tabla 4.5: Parámetros de simulación de estudio comparativo LTE	56
Tabla 4.6: Comparativa de resultados de todos los modelos	58
Tabla 4.7: Parámetros del estudio comparativo	64
Tabla 4.8: Parámetros de simulación de la red LTE-A.....	67
Tabla 4.9: Resultados del análisis de correlación.....	68
Tabla 5.1: Requisitos de experiencia de usuario 5G	70
Tabla 5.2: Mejoras previstas para 5G en capacidades de red.....	71
Tabla 5.3: Uso de las bandas prioritarias	79
Tabla 5.4: Parámetros de los modelos CI, CIF y ABG para distintos escenarios	86
Tabla 5.5: Desvanecimiento por ensombrecimiento en interiores.....	87
Tabla 5.6: Parámetros obtenidos	88

1. Introducción

En este trabajo analizaremos el tema de los modelos de propagación para comunicaciones móviles, enfocándonos en la cuarta y quinta generación que son la implementada en la actualidad y la esperada en el 2020 respectivamente. A día de hoy existen numerosos proyectos de investigación cuyo objetivo consiste en dar solución a los requisitos planteados por la nueva generación de comunicaciones móviles, así como el desarrollo de mejoras para la actual. Apoyándonos en los resultados de estos estudios junto con comparaciones y ejemplos, intentaremos dar una visión global de los modelos de predicción de pérdidas utilizados hoy en día y trataremos de analizar las características que deberán tener en el futuro.

Actualmente la demanda de mejores servicios y nuevas funcionalidades en las redes es la que domina el mercado de las comunicaciones móviles, lo que hace que las empresas de este sector se encuentren en una lucha permanente por innovar las tecnologías disponibles. En el caso de la evolución de los modelos de propagación podríamos decir que va de la mano con el desarrollo de las comunicaciones móviles, ya que se hacen necesarios nuevos modelos de predicción por cada nuevo modelo de canal surgido de los requisitos de una nueva generación, la incorporación de nuevos escenarios, etc.

En toda planificación de sistema de comunicaciones móviles es necesario emplear previamente modelos de propagación que permitan determinar la atenuación que sufrirá la señal en el entorno requerido. Cuanto más precisos sean los resultados que arrojen los cálculos de predicción de pérdidas menor será el error que cometamos a la hora de realizar las simulaciones para después instalar el sistema. Por lo tanto, la elección del modelo de propagación que vamos a usar se convierte en un punto crítico de la planificación, ya que de ella puede depender el éxito o fracaso de nuestra tarea.

Dada la importancia de este tema, el objetivo del trabajo será el de analizar los modelos de propagación que se emplean a día de hoy en las redes 4G, tanto para el estándar LTE como para LTE Advanced, y presentar algunos de los modelos propuestos para la nueva generación 5G. Con este objetivo en mente se optó por la división del documento en cinco bloques.

El primero de ellos, comunicaciones móviles y modelos de propagación, intenta meternos en el contexto histórico de estos dos aspectos que, como señalamos con anterioridad, han evolucionado juntos. En primer lugar tratamos de establecer una definición propia de modelo de propagación que se ajuste a nuestro cometido, para después ya meternos en la historia y la evolución que han sufrido a lo largo de ella, tanto las comunicaciones móviles como los modelos de propagación.

El segundo bloque es una clasificación de los modelos de propagación que hemos confeccionado basándonos en tres aspectos, el ambiente de propagación, el área de cobertura y el origen de los datos. En cada una de las clasificaciones veremos ejemplos de modelos de cada tipo.

A continuación, en el tercer bloque, expondremos los modelos de propagación para comunicaciones móviles 4G. La estructura de esta apartado está dividida en dos tecnologías diferentes (LTE y LTE-Advanced), la primera agrupa los cuatro primeros apartados y la segunda los dos siguientes. En ambas primero se presentan algunos conceptos básicos con el cometido de ayudar a una mejor comprensión, seguido del modelo de canal y los modelos de predicción utilizados en

cada una de ellas. En la parte de los modelos de propagación se hace uso de estudios comparativos realizados previamente para determinar el comportamiento de los modelos en cada entorno y de algún ejemplo de simulación.

El cuarto bloque, propuestas de modelos de propagación para comunicaciones móviles 5G, realiza una pequeña introducción al 5G en la que se presentan los requisitos que deberá cubrir esta nueva generación en cuatro apartados. Seguidamente se muestran las bandas de frecuencia en las que se pretende trabajar y que actualmente son objeto de estudio de numerosos proyectos y empresas. Por último se trata el tema de los modelos de canal y de predicción de pérdidas en 5G, para finalizar con un ejemplo en un escenario real.

La última parte del trabajo es un apartado de conclusiones extraídas de los anteriores puntos y de posibles futuros trabajos en este tema.

2. Comunicaciones móviles y modelos de propagación

2.1. Definición de modelo de propagación

En primer lugar vamos a formular una definición de los modelos de propagación, que describa correctamente su finalidad y sea lo más completa posible. Para ello vamos a partir de una de las definiciones más completas de la web cuyos conceptos se repiten en numerosos artículos, y la modificaremos con el objetivo de facilitar una mejor comprensión de los próximos puntos.

En la edición en Inglés de Wikipedia, la definición de modelo de propagación dice lo siguiente: *‘A radio propagation model, also known as the Radio Wave Propagation Model or the Radio Frequency Propagation Model, is an empirical mathematical formulation for the characterization of radio wave propagation as a function of frequency, distance and other conditions. A single model is usually developed to predict the behavior of propagation for all similar links under similar constraints. Created with the goal of formalizing the way radio waves are propagated from one place to another, such models typically predict the path loss along a link or the effective coverage area of a transmitter’* [1].

De esta definición podemos extraer las siguientes conclusiones:

- El objetivo de los modelos de propagación consiste en la caracterización de la propagación de las ondas de radio.
- Son modelos matemáticos que emplean como parámetros para sus cálculos la distancia, la frecuencia y otras condiciones del medio.
- Los modelos suelen predecir las pérdidas del camino de un enlace radio, o bien la distancia de cobertura de un transmisor.

Sin embargo, según la clasificación de los modelos que haremos más adelante, no podemos quedarnos con todo lo dicho en esta descripción. El motivo es que se describe el modelo de propagación como una formulación matemática empírica y, como veremos a continuación, esto no tiene por qué ser así.

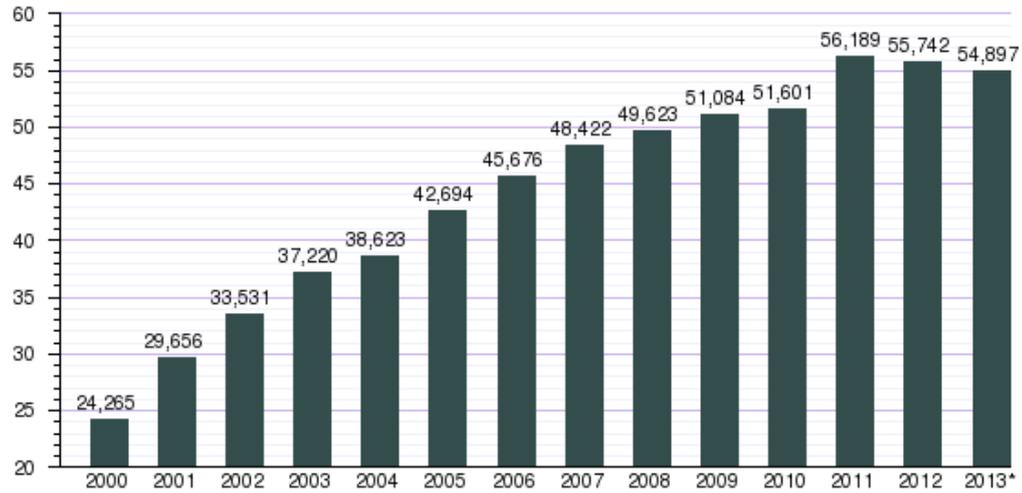
En nuestra definición también haremos referencia a la dependencia de los modelos de propagación con los medios para los que se formulan, debido a que es un factor determinante para este tipo de ecuaciones matemáticas.

Teniendo en cuenta lo citado anteriormente, nuestra definición quedaría:

*‘En el ámbito de las comunicaciones móviles, un **modelo de propagación** es una expresión matemática cuyo objeto es caracterizar la propagación de las ondas de radio en función de una serie de parámetros, tales como la frecuencia, la distancia y otros factores que dependerán de cada modelo. Los distintos tipos de modelos de propagación se formulan teniendo en cuenta el entorno al que se aplican, por lo que un único modelo determinará el comportamiento de todos los enlaces de un mismo medio. Teniendo en cuenta su cometido, el empleo de estas ecuaciones suele ser para predecir las pérdidas de un enlace radio, o bien para determinar la distancia de cobertura del sistema transmisor’.*

2.2. Historia y evolución de las comunicaciones móviles

Una vez tenemos una definición que describe la base de nuestro trabajo vamos a situarnos en el contexto histórico de estos modelos matemáticos, así como de su enorme evolución en los últimos años propiciada por el auge experimentado por las comunicaciones móviles.



*Datos de 2013 correspondientes al mes de junio.

Figura 2.1. Evolución del número de líneas de telefonía móvil en España en el periodo de 2000 a 2013 (millones de líneas)

Fuente: Observatorio Red.es. Gráfica elaborada en Wikipedia.

En la figura 2.1 podemos observar como desde el año 2006 en España el número de líneas de móvil supera al número de habitantes del país.

A la hora de realizar un análisis de los modelos según han ido surgiendo en el tiempo, hay que tener en cuenta que éstos se han desarrollado paralelamente a las comunicaciones móviles, y a la necesidad de planificar los radioenlaces en distintos medios y con las características propias de cada generación de móviles.

Así pues lo que haremos será resumir brevemente la historia de las comunicaciones móviles para, a continuación, indicar los modelos de propagación que se han utilizado y se utilizan en cada generación.

2.2.1. Precedentes

Fue a principios del siglo XX, cuando Marconi desarrolló su sistema de telegrafía sin hilos con el propósito de establecer comunicación entre los barcos y el puerto y entre ellos mismos, y de esta manera evitar colisiones. Éste puede ser considerado como el primer sistema de comunicaciones móviles, en tanto que bien el emisor o bien el receptor podían estar en movimiento debido a la ausencia de cables en la transmisión. A partir de aquí comenzaron a evolucionar este tipo de comunicaciones, así como el concepto de estructura celular que es el empleado hoy en día por los sistemas celulares, y que no debemos perder de vista puesto que son el objeto de nuestro estudio. Las primeras aproximaciones a lo que hoy en día se conoce como sistema celular, tuvieron lugar en torno a 1950 y ya incluían conceptos como la división del área

en pequeñas celdas para permitir la reutilización de frecuencias. El problema era que para el correcto funcionamiento de este modelo se precisaba que los teléfonos móviles utilizaran frecuencias altas, por lo que no fue posible hasta unas décadas más tarde, cuando la tecnología lo permitió, implementar estos sistemas [3][4].

2.2.2. Primera generación

La evolución tuvo lugar de forma paralela en EE.UU. y en Europa a principios de los años 80, cuando comenzaron a comercializarse los primeros sistemas celulares. En Estados Unidos surgió el sistema AMPS (American Mobile Phone System) que más tarde se convertiría en el sistema TACS (Total Access Communication System) en Europa. Sin embargo, el primer sistema de telefonía móvil tal y como se conocen ahora, fue el NMT (Nordisk MobilTelefoni) 450 lanzado por Ericsson en 1981 en los países nórdicos, y su posterior evolución, el sistema NMT 900 en 1986. Todos estos sistemas, de tecnología analógica, son los conocidos hoy en día como de primera generación.

2.2.3. Segunda generación

La digitalización de este tipo de sistemas de comunicación dio lugar a la segunda generación de móviles. En Estados Unidos la evolución del sistema AMPS culminó en la tecnología IS-54 o Digital AMPS, que más tarde se convertiría en el IS-136 con la introducción de mejoras. Paralelamente se fue desarrollando el estándar IS-95 que empleaba las técnicas de acceso múltiple por división de código (CDMA). Mientras tanto, en Europa, se dieron cuenta de la necesidad de definir un sistema que pudiese utilizarse en todos los países del continente empleando la tecnología digital. Surgió así el estándar GSM, desarrollado por el ETSI (European Telecommunications Standar Institute) y que más tarde ha sido el universalizado en telefonía móvil debido al buen servicio proporcionado en las llamadas de voz y una arquitectura de red eficiente, entre otros factores. Sin embargo, con el paso de los años surgió la necesidad de incorporar servicios multimedia que precisaban de un aumento de la capacidad de transmisión de datos del sistema. Esto tuvo como consecuencia el comienzo del desarrollo de una nueva generación (3G) que permitiese la incorporación de estos servicios.

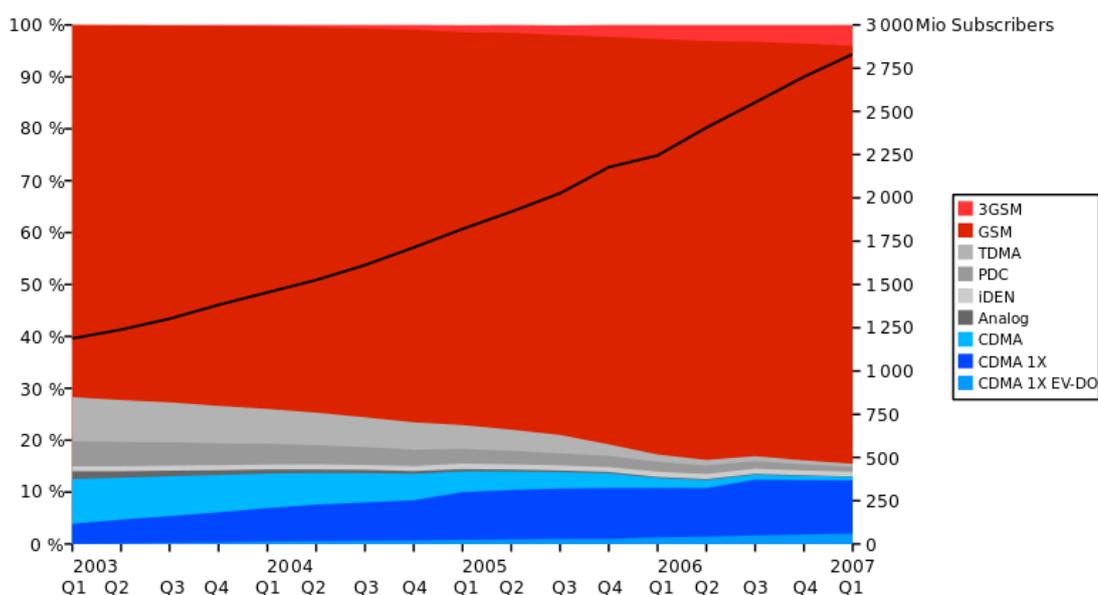


Figura 2.2. Evolución del número de usuarios de telefonía móvil según el estándar que usan [4]

Como ocurre en todos los cambios de tecnologías de distintas generaciones, hasta que la nueva no alcanza un grado de madurez suficiente que posibilite un servicio de calidad aceptable, se realizan mejoras en la existente que permitan aumentar sus prestaciones. De esta manera surgen las denominadas generaciones intermedias o de transición, que en el caso de la segunda fueron la 2.5 (GPRS) y la 2.75 (EDGE). También es necesario comentar que el hecho del surgimiento de nuevas tecnologías no implica que se dejen de utilizar las predecesoras, es más, estas conviven durante un periodo de años que depende de hasta cuando mantenga el servicio cada país.

2.2.4. Tercera generación

Como se ha dicho anteriormente, la tercera generación surgió para integrar servicios multimedia como la navegación por Internet, la televisión, la videoconferencia, etc. Además, en un principio se estudió la idea de un sistema global que proporcionase cobertura e itinerancia por todo el mundo. Esta propuesta aparece recogida por la ITU (International Telecommunication Union) como IMT-2000 (International Mobile Telecommunications), pero por intereses de tipo económico y estratégico nunca llegó a ponerse en práctica. No obstante surgieron nuevos estándares como el sistema CDMA 2000 en EE.UU. y el sistema UMTS en Europa que son considerados de la tercera generación, aunque no son compatibles entre ellos. En el año 2000 empezaron a repartirse las licencias a los operadores de Europa para emplear este tipo de tecnologías, aunque no fue hasta unos años más tarde cuando empezaron a comercializarse sus servicios.

Al igual que ocurrió con las generaciones precedentes, entre la tercera generación de móviles y la cuarta, hubo una serie de mejoras sobre las redes 3G que aumentaron sus prestaciones y que son conocidas como generaciones intermedias (3.5, 3.75 y 3.9 G). El caso más curioso es el de la tecnología LTE puesto que hay quién la considera como una evolución del sistema UMTS y HSPA, y por lo tanto debería englobarse como generación 3.9, mientras que otros basándose en la evolución de su arquitectura ya la incluyen dentro de la cuarta generación, pese a no cumplir los estándares. En España, por ejemplo, las operadoras ofertaron LTE a sus consumidores como 4G, esto fue posible debido a que el IMT Advanced, nuevo comité encargado de definir las especificaciones de 4G, permitió que así fuese. En cambio su posterior *release* LTE Advanced es la que verdaderamente cumple con los estándares, y por eso esta tecnología ya se ofrece por algunas operadoras como 4G+.

2.2.5. Cuarta generación

En 2008 la ITU creó el IMT Advanced, que definía los requisitos que debían cumplir los nuevos estándares de comunicaciones móviles para ser considerados de 4G. Pese a que este organismo ha permitido ofertar tecnologías que no cumplen con todos sus requisitos como tecnologías 4G, hay dos sistemas candidatos que esperan cumplir todos ellos e incluso superarlos, éstos son LTE Advanced y WiMAX Release 2. En España las grandes operadoras han optado por la tecnología LTE Advanced y actualmente se encuentra en fase de implementación en las grandes ciudades, y en algunas de ellas ya es posible conectarse a este tipo de redes. En cuanto a WiMAX, es una alternativa que actualmente se emplea en entornos de difícil acceso con un menor número de usuarios.

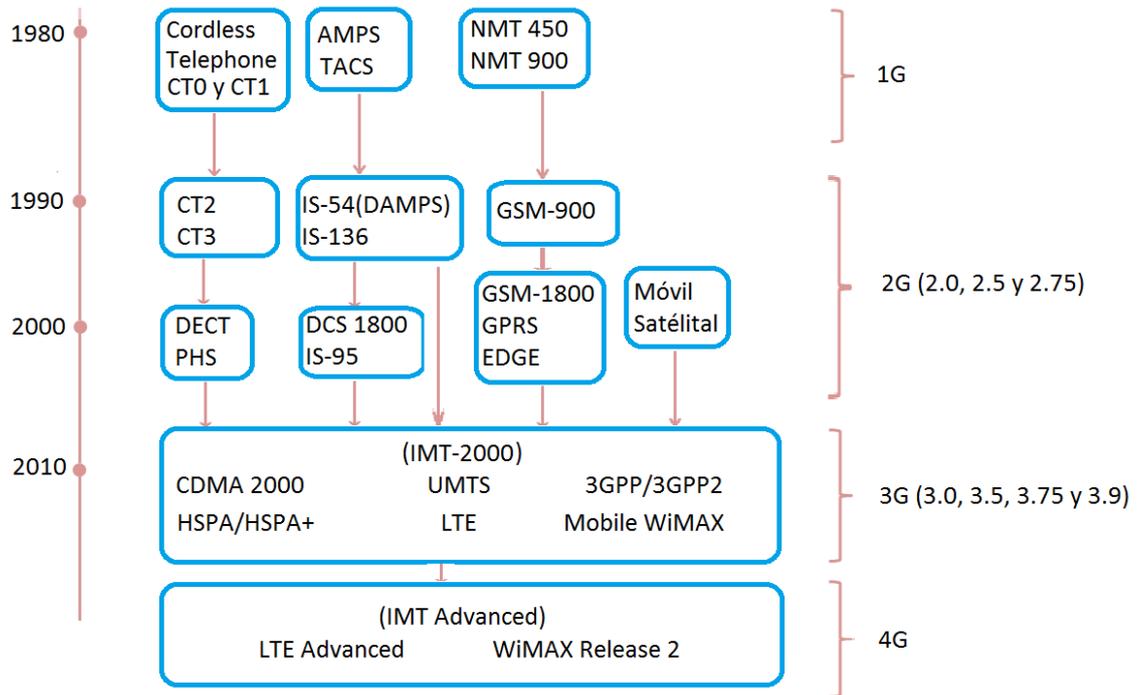


Figura 2.3. Evolución de los sistemas de comunicaciones móviles [3]

2.2.6. Quinta generación

En cuanto a la futura generación 5G, en la actualidad hay distintos proyectos por todo el mundo (en Europa uno de los principales proyectos se denomina METIS: Mobile and wireless communications Enablers for Twenty-twenty Information Society) cuyo objetivo es el estudio de las tecnologías y especificaciones para esta nueva generación, que se espera que esté en funcionamiento en 2020. Las características de este nuevo estándar serán la conectividad total entre dispositivos, el acceso a la información y los servicios en cualquier parte, y una gran calidad de servicio acompañada de un enorme volumen de tráfico.

2.3. Historia y evolución de los modelos de propagación

Una vez hemos analizado la historia y evolución de los sistemas de comunicaciones móviles, vamos a analizar el desarrollo paralelo que experimentaron las metodologías de cálculo que permitían la planificación de estos sistemas.

Los modelos de propagación han ido evolucionando desde cálculos basados en métodos empíricos en los primeros sistemas, hasta complejos programas informáticos que emplean la teoría geométrica de la difracción sobre mapas digitales del terreno que se emplean hoy en día.

Desde la introducción del concepto de sistemas celulares se hizo imprescindible la reutilización de frecuencias a la hora de diseñar los sistemas móviles, debido a que se trata de un recurso espectral finito. Esto llevó a la necesidad de mejorar la precisión en el cálculo de la cobertura de cada transmisor, y así poder optimizar el uso del espectro de frecuencia. Para poder llevar a cabo este cometido se requería de procesos complejos y cálculos tediosos cuya resolución se convertía en una tarea cuanto menos improductiva, por lo que se comenzó a informatizar estos procesos de predicción.

Hoy en día los modelos de propagación de los sistemas móviles intentan caracterizar cuatro aspectos de la propagación:

- a) Determinación de la pérdida básica de propagación o de la intensidad de campo.
- b) Análisis de la propagación multitrayecto y dispersiones temporal y frecuencial.
- c) Desarrollo de modelos de simulación de canal (modulación y protección).
- d) Realización de medidas reales para comprobar los resultados.

2.3.1. Principios básicos de cálculo de coberturas

En comunicaciones móviles es necesario garantizar un valor medio de campo eléctrico que delimitará el área de cobertura. En los sistemas analógicos este valor viene determinado por la sensibilidad del receptor, las correcciones por ruido y multitrayecto y la variabilidad estadística del campo debida a la ubicación y el tiempo. Por otro lado, en los sistemas digitales lo que buscamos obtener es la relación energía por bit/densidad espectral de ruido para una tasa de errores deseada y teniendo en cuenta las condiciones del medio.

Los sistemas celulares son fundamentalmente sistemas limitados por interferencia, por lo que los modelos de propagación permitirán también el cálculo de la relación señal deseada, correspondiente a la célula en la que está el móvil, con respecto a las interferencias producidas por otras células cocanal.

En cuanto a las metodologías de cálculo, su principal objetivo es la determinación de la atenuación de propagación o pérdida básica en función de variables como el tipo de terreno, la frecuencia, la polarización de la onda, altura de las antenas, etc. [5].

2.3.2. Sistemas clásicos

Surgen en los años cincuenta y sesenta, y se aplican a los sistemas en los que no existe una reutilización de frecuencias significativa. Su uso se limita al uso de despacho en el ámbito privado y a las primeras soluciones de telefonía móvil en vehículos en el ámbito público, que se caracterizan por el empleo de una estación base potente de gran altura y receptores satélites. El área de cobertura fue rural en su mayor parte y utilizaba la banda de VHF.

Este tipo de modelos eran de naturaleza empírica y entre ellos caben destacar [5]:

- Ábacos de Bullington: modelos que empleaban la teoría de la difracción en obstáculos. Su utilidad residía principalmente en los medios rurales, mientras que para los urbanos se empleaba el método de Young basado en medidas que obtuvo en la ciudad de Nueva York. Este método se convirtió en una primera aproximación a otros más complejos que requerían de correcciones en las medidas y ajustes empíricos de las mismas.
- Curvas normalizadas de propagación: Una de las primeras familias de curvas fue la de la Recomendación 370 del CCIR (actualmente UIT-R), que se utilizaron para radiodifusión y televisión en los años 60. Más tarde se elaboró el informe 567 cuya aplicación se concentraba en los servicios móviles. Dentro de este informe posterior caben diferenciar las curvas derivadas de la Recomendación 370 para el medio rural y una nueva familia de curvas para el medio urbano obtenidas de mediciones efectuadas en Japón por Okumura entre otros, y que darían lugar a nuevos métodos de predicción.

- Método de Okumura: Fue el más completo para medios urbanos y su vigencia se mantuvo durante las dos décadas posteriores. Este método tiene en cuenta características del terreno como la ondulación, la pendiente, obstáculos aislados, tramos sobre agua y algunas otras correcciones. A partir de este modelo de propagación se desarrollaron otros posteriores que añadían factores de corrección y mejoras en las medidas otorgando así una mayor precisión a los resultados obtenidos.

Con el objetivo de aumentar la velocidad de los cálculos de estos modelos y una vez los ordenadores lo permitieron, se buscaron fórmulas empíricas que pudiesen ser implementadas en programas informáticos. Estos modelos permitieron calcular la pérdida básica por ordenador y destacaron el de Egli para propagación en terreno irregular por encima de 40 MHz, y el de Longley y Rice que introdujo el concepto de alturas efectivas de las antenas [5].

2.3.3. Sistemas informatizados

Aunque el objetivo de obtención de la pérdida básica de propagación seguía siendo el mismo, los modelos de predicción para los sistemas móviles informatizados aparecieron al cobrar importancia la reutilización de frecuencias en la planificación celular en los años ochenta.

El sector privado englobaba los sistemas de señalización digital y concentración de enlaces (trunking) y los sistemas móviles de datos con despacho asistido por ordenador (CADS). Por otro lado, el público estaba constituido por sistemas analógicos de telefonía celular, tecnología predecesora a los sistemas celulares de hoy en día.

Para comprender este tipo de sistemas es necesario diferenciar tres aspectos, como el dimensionamiento de las células, los modelos de propagación y el uso de mapas del terreno.

Cálculos de dimensionamiento

Cuando trabajamos con los sistemas de trunking privado, el dimensionamiento se calcula a partir del grado de servicio (GOS) y mediante una distribución Erlang C convencional.

Sin embargo, para el caso de los sistemas públicos celulares este cálculo adquiere una mayor complejidad, puesto que hay que tener en cuenta aspectos propios de este tipo de sistemas como el número de canales disponibles, el tamaño de la agrupación celular (*cluster*), el número de abonados por celda, índice de reutilización, etc. Actualmente hay sistemas que permiten el dimensionamiento dinámico debido a su gran capacidad de procesamiento y velocidad de señalización, pero esto obviamente no fue posible con los sistemas de primera generación que eran de asignación fija.

Modelos de propagación

Una vez se divide el espacio en células mediante el dimensionamiento anterior, se realizan los cálculos de la cobertura a lo largo de varios radiales equiespaciados en torno a la estación base. Se trata de un proceso tedioso y que requería de la aplicación de los distintos modelos de propagación de manera repetida por cada radial, por lo que se informatizaron los cálculos. Al igual que hemos venido haciendo anteriormente vamos a diferenciar los modelos para entornos urbanos y rurales.

En medios urbanos los modelos de propagación calculan la pérdida básica de propagación según la fórmula 2.1:

$$l_b(d) = K \cdot d^\alpha \quad (2.1)$$

Donde K depende del medio, altura de las antenas y la frecuencia, y α es un factor que caracteriza al medio (exponente de la pendiente de pérdidas).

Esta ley de variación con la distancia suele llamarse de punto-pendiente y fue utilizada como base por W. C. Lee para formular su método de propagación.

En este apartado merece una mención especial el método desarrollado por M. Hata basado en las curvas de Okumura vistas anteriormente, por lo que también es conocido como el método de Okumura-Hata. Este modelo de predicción también es extrapolable al medio suburbano y rural, y su importancia reside en la sencillez de los cálculos que integra así como la amplia gama de frecuencias para las que se puede aplicar.

A partir del método de Okumura-Hata surgieron mejoras de éste que incorporaban efectos producidos por los edificios limítrofes y la anchura de la calle en la que se encuentra el móvil. Algunos de estos métodos son [5]:

- Allsebrook-Parsons
- Ibrahim-Parsons
- Ikegami-Ioshida
- Walfish-Bertoni
- Sakagami-Kuboi

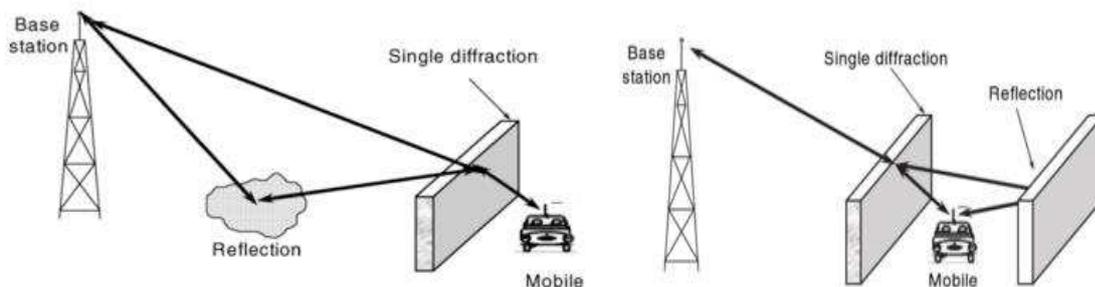


Figura 2.4. Interpretación física del modelo de Allsebrook-Parsons (izquierda) y del modelo de Ikegami-Ioshida [6]

A partir de una combinación de los métodos anteriores y de medidas realizadas en ciudades europeas, el grupo de trabajo del Proyecto Europeo COST 231 desarrolló su propio modelo de propagación.

En la tabla 2.1 se comparan los distintos modelos expuestos en función del exponente de su pendiente de pérdidas:

Modelo	Exponente de la pendiente de pérdidas
Espacio libre	2
Tierra plana	4
Egli	4
Lee	2 - 4.3
Ibrahim	4
Allsebrook	4
Ikegami	1
Walfisch-Bertoni	3.8

Tabla 2.2. Comparación de modelos según la pendiente de pérdidas [6]

En cuanto a los modelos de propagación de este apartado en el medio rural, de todos los existentes, destacaremos los de Grosskopf y G.Y. Delisle, que al igual que muchos otros se basan en mediciones obtenidas y comparaciones [5].

Utilización de mapas del terreno

El cálculo de la cobertura mediante la manera descrita en el apartado anterior, es decir, obteniendo resultados en radiales alrededor de la estación base, puede realizarse de forma mucho más eficiente con el empleo de mapas digitales del terreno. El uso de mapas topográficos permite a los ordenadores conocer el perfil del terreno de cada trayecto para poder estimar las pérdidas de la señal en las bandas VHF y UHF.

Este tipo de mapas requieren una base de datos del terreno (BDT) con la información del mismo, bien sea como curvas de nivel digitalizadas, o como retículas tridimensionales. Como se trata de un conjunto de muestras finito, es necesario definir la distancia entre muestras consecutivas o el *paso de muestreo*, que se determinará dependiendo de la orografía del terreno, la capacidad de almacenamiento de la base de datos, el nivel de detalle deseado y el tiempo del cálculo necesario. Una vez obtenido el perfil del terreno, se aplica sobre éste el modelo de predicción deseado o que más convenga.

Uno de los primeros modelos de propagación que hacía uso de mapas digitales del terreno fue el de Durkin, que fue seguido por otros como el de Lorentz. Normalmente los programas informáticos que integran los modelos de propagación capaces de realizar este tipo de cálculos, suelen representar además del trayecto del rayo, la región de Fresnel, las zonas de sombra radioeléctrica, la variación del campo a lo largo del recorrido, el área de cobertura... Todas estas salidas son de gran ayuda tanto en la planificación de radioenlaces (programa Radio Mobile [29]) como en la planificación celular. En la actualidad, algunos ejemplos de los programas profesionales más utilizados y que se valen de mapas digitales del terreno son Xirio [30], Atoll [31] y Mentum Planet [32].

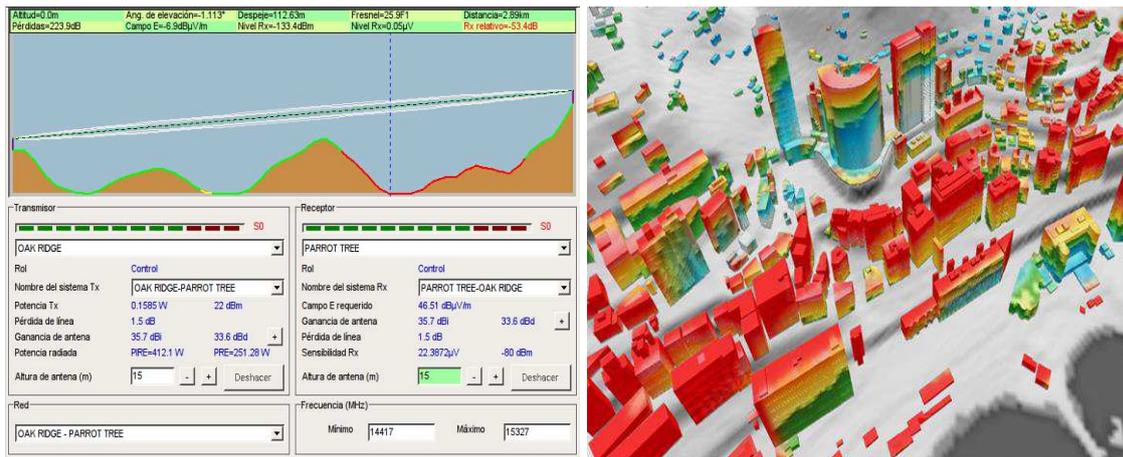


Figura 2.5. Ejemplo de cálculo de radioenlace con Radio Mobile (izquierda) [29] y planificación de red LTE con Planet (derecha) [32]

3. Clasificación de los modelos de propagación

3.1. Introducción a la clasificación

En el apartado anterior hemos visto los precedentes de los modelos de propagación, así como su evolución en paralelo con las comunicaciones móviles. Llegados a este punto vamos a intentar establecer una clasificación de estos modelos matemáticos diferenciándolos según tres aspectos fundamentales de los mismos.

Dentro de cada grupo estudiaremos las características que lo definen y, en función de éstas, los modelos que mejor se ajusten en cada caso proponiendo algunos como ejemplos. En la actualidad hay multitud de modelos, y como en tantos otros casos no hay una única manera de clasificarlos, por lo que nuestra clasificación atenderá a tres características distintas:

- a) *Ambiente de propagación*: dependiendo del entorno en el que vayamos a realizar los cálculos, nos convendrá emplear un modelo u otro. Esta manera de clasificar los modelos será la que se centre en escoger el modelo que más nos convenga según el ambiente de propagación. Diferenciaremos dos grandes grupos, la propagación en exteriores y la propagación en interiores. Como la primera aglutina una mayor cantidad de ambientes que la segunda, estudiaremos los casos más generales de ella. Por cada medio referido realizaremos un estudio de cada caso y veremos algunas simulaciones y ejemplos de ellos.
- b) *Área de cobertura*: la segunda clasificación va a depender del área de cobertura que pretendamos estudiar. Como hemos visto anteriormente los sistemas celulares actuales dividen su área de cobertura en células, por lo que no será lo mismo realizar los cálculos para una macrocélula de gran extensión que para una picocélula mucho menor, realizaremos una comparación de los distintos métodos para ver cuáles son los que más se ajustan a cada caso.
- c) *Origen de los datos*: esta última clasificación atenderá a la manera de obtener los datos de cada modelo. Por lo tanto diferenciaremos los sistemas como deterministas, empíricos o una combinación de ambos (semi-empíricos). Esta manera de clasificarlos es la más común en multitud de artículos puesto que no depende del ambiente ni de sus condiciones, sino simplemente de las características de cada modelo. Aun así según el lugar en el que se realizarán los cálculos puede establecerse una relación directa con cada tipo de esta clasificación.

La figura 3.1 permite ilustrar el esquema de la clasificación propuesta:

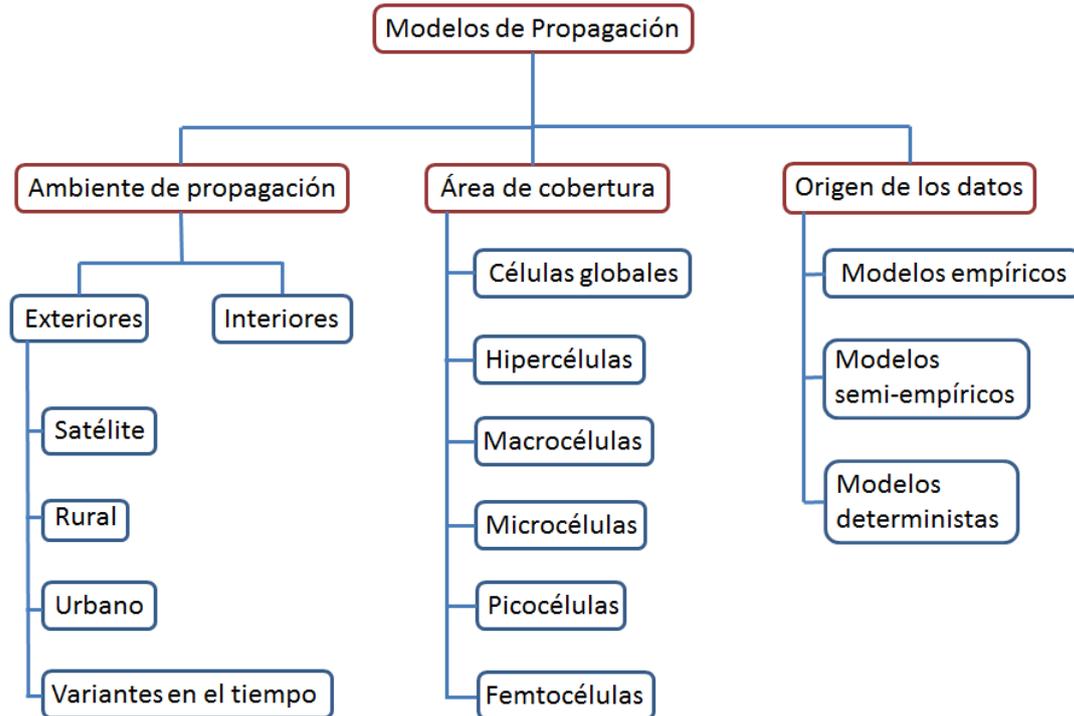


Figura 3.1. Clasificación de los modelos de propagación

3.2. Clasificación según el ambiente de propagación

La primera clasificación de las expuestas anteriormente se basa en la agrupación de modelos teniendo en cuenta el ambiente de propagación. Como ya hemos señalado, vamos a dividir esta clasificación en dos grandes escenarios, uno el interior y otro el exterior. Comenzaremos definiendo el primero de ellos ya que dentro de sus entornos se presenta un caso más general, mientras que en los escenarios exteriores varían mucho las consideraciones a tener en cuenta según el caso en el que nos encontremos.

3.2.1. Interiores

Cuando nos referimos a la propagación radioeléctrica en interiores, nos referimos a la que tiene lugar dentro de los edificios, como por ejemplo centros comerciales, bloques de oficinas, viviendas particulares, estadios, etc. En estos escenarios habrá que tener en cuenta una serie de efectos que condicionan la propagación, como puede ser la existencia de obstáculos (paredes, techos, muebles...), la difracción producida en las esquinas, el efecto guía de ondas que tiene lugar en los pasillos debido a las múltiples reflexiones dentro de ellos, etc.

En este tipo de entorno, para frecuencias de trabajo por debajo de los 600 MHz, los modelos empíricos (punto 3.4.1.) suelen ser lo bastante precisos para poder realizar los cálculos de propagación con ellos. Sin embargo, para frecuencias por encima de los 600 MHz (típicamente comunicaciones móviles) los modelos empíricos no sirven, por lo que se emplean los deterministas (punto 3.4.3.), ya que tienen en cuenta la propagación multitrayecto con reflexiones y difracciones.

Las aplicaciones de los modelos de propagación en interiores son múltiples:

- Planificación de redes celulares.
- Planificación de redes WLAN en edificios de múltiples plantas.
- Análisis de recepción de emisiones terrestres o por satélite.
- Análisis de cobertura y planificación de red en túneles o estaciones de metro.

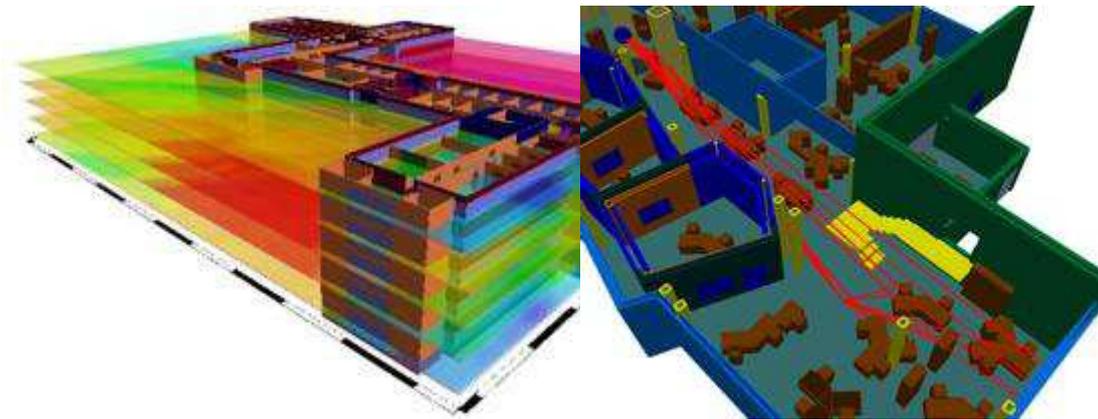


Figura 3.2. Predicción en edificio de oficinas con múltiples plantas (izquierda).
Escenario de propagación interior multirayecto (derecha) [7]

Como señalamos al comienzo, la propagación en interiores no sólo se limita a los edificios, sino que puede referirse a la transmisión radioeléctrica dentro de cualquier tipo de estructura, como túneles, estadios, coches, trenes, etc.

En la actualidad los modelos de propagación están informatizados, hecho que permite realizar multitud de cálculos de manera eficiente en el tiempo. La clave de estos programas es la incorporación de bases de datos de las superficies que conforman las paredes, techos y obstáculos, para que el usuario pueda definir el entorno de estudio de manera muy realista.

Algunos ejemplos de modelos que se utilizan para estudiar la propagación en interiores son:

Empíricos

➤ *Modelo de una pendiente:*

Es uno de los más rápidos para realizar los cálculos debido a que únicamente depende de la distancia entre el transmisor y el receptor, que afecta al exponente de pérdidas del trayecto. Este modelo no tiene en cuenta el efecto de paredes y otros objetos.

Resulta interesante como primera aproximación al posterior análisis en detalle del escenario. La ecuación que determina la pérdida básica es:

$$PL[dB] = L_0 + 10 n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \gamma \quad (3.1)$$

Donde:

d: distancia entre el transmisor y el receptor

L_0 : pérdidas a una distancia de referencia (d_0) en condiciones de espacio libre

n : pendiente de pérdidas

γ : variable aleatoria con distribución log-normal

➤ *Modelo de Motley-Keenan:*

En este modelo sí se tienen en cuenta las paredes que se encuentra el rayo directo entre el transmisor y el receptor. Se define una atenuación para las paredes y otra para los techos que serán las que se apliquen posteriormente a las interceptadas por el rayo. Su ecuación resulta:

$$PL[dB] = L_0 + 20 \log(d) + p \cdot \alpha + k \cdot \beta \quad (3.2)$$

Donde:

L_0 : pérdidas de referencia (en espacio libre)

p : número de paredes entre el transmisor y el receptor

α : factor de atenuación por pared

k : número de plantas entre el transmisor y el receptor

β : factor de atenuación de planta

➤ *Modelo Multi-Wall COST 231:*

Este modelo es el más completo de todos los empíricos. Al igual que el caso anterior se tienen en cuenta las paredes interceptadas por el rayo directo entre el transmisor y el receptor, pero además por cada una de ellas se consideran los materiales que las componen para definir su atenuación de manera individual y más precisa.

A menudo este modelo arroja peores predicciones que las luego medidas en casos reales, por lo que se suele corregir disminuyendo la atenuación producida por las últimas paredes en casos de múltiple penetración. La ecuación que nos da la pérdida básica de este modelo es [3]:

$$PL[dB] = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log(d) + \sum_{i=1}^I K_{wi} L_{wi} + \sum_{j=1}^J K_{fj} L_{fj} \quad (3.3)$$

Donde:

L_0 : pérdidas de referencia (en espacio libre)

n : pendiente de pérdidas con la distancia

I : número de categorías de paredes

K_{wi} : número de paredes de la categoría i

L_{wi} : pérdidas de la pared de tipo i

J : número de tipos de suelos

K_{fj} : número de suelos de tipo j

L_{fj} : pérdidas del suelo de tipo j

Deterministas:

➤ *Modelo de predicción de trayecto dominante:*

Tiene en cuenta el efecto de guía de ondas que se produce en los pasillos debido a las múltiples reflexiones. Utiliza bases de datos 3D de los edificios donde se realizan los cálculos y considera tanto la geometría como las propiedades de los materiales con los que están construidas las paredes.

Puede emplearse en cálculos tanto en edificios de una planta como en los de múltiples plantas, donde se tiene en cuenta el mismo efecto guía de ondas en las escaleras.

➤ *3D Standard Ray Tracing (SRT):*

Modelo típico de trazado de rayos, en el que se consideran todos los caminos posibles entre el emisor y el receptor teniendo en cuenta las reflexiones y difracciones que se producen en cada obstáculo. Normalmente el software que lo implementa permite fijar un máximo de reflexiones con el objetivo de limitar el número de trayectos posibles, que de otra manera sería incalculable.

Además del nivel de potencia de la señal en cada punto, este tipo de modelos permiten calcular el retardo por dispersión, la respuesta al impulso del canal, la matriz de transmisión, el vector de campo eléctrico...

➤ *3D Intelligent Ray Tracing (IRT):*

Se trata de una optimización del modelo anterior. Mediante el preprocesado de los datos del edificio consigue reducir el tiempo de cálculo de los múltiples trayectos. El preprocesamiento se realiza con las siguientes consideraciones:

- Sólo unos pocos rayos llevan la mayor parte de la energía de la señal.
- La relación de visibilidad entre las paredes y los bordes son independientes de la posición del transmisor.
- Normalmente los puntos adyacentes donde se realizan los cálculos son alcanzados por los mismos rayos.

Con estas consideraciones se realizan una serie de cálculos sobre los datos del edificio que posteriormente agilizarán el análisis de todos los trayectos posibles.

La figura 3.3 compara alguno de los modelos expuestos anteriormente en un caso práctico:

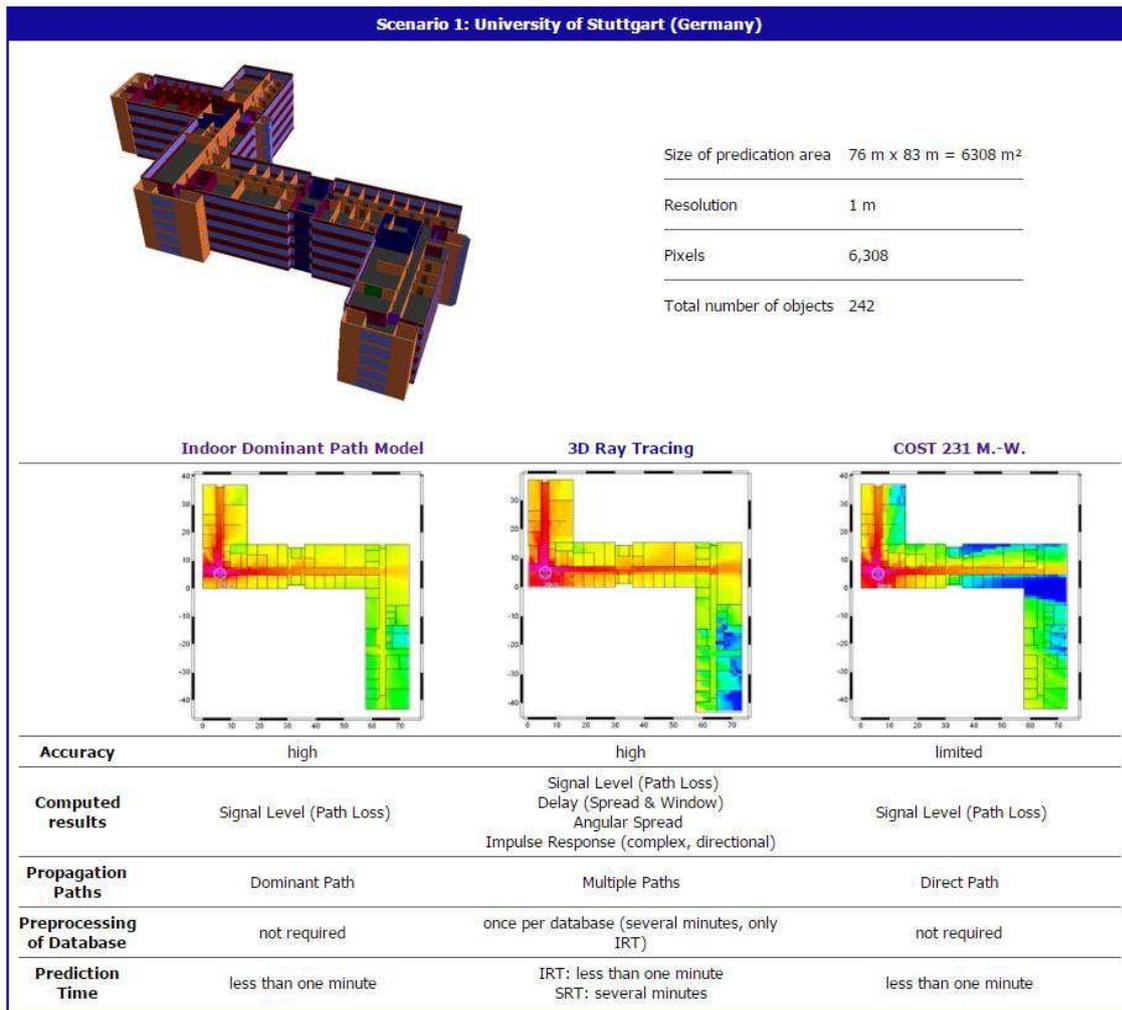


Figura 3.3. Comparación de los modelos de propagación para interiores [7]

3.2.2. Exteriores

A continuación vamos a ver el caso de los entornos exteriores, entre los que se encuentran una gran variedad de escenarios muy distintos entre ellos. A diferencia de la propagación en interiores donde pese a haber visto distintos ambientes que en un principio pueden parecernos muy diferentes, como por ejemplo un túnel y un edificio de viviendas, a efectos de la propagación de las ondas que tiene lugar en su interior son muy semejantes, ya que se rigen por los mismo efectos descritos anteriormente como pueden ser la reflexión y difracción en lugares confinados o delimitados estructuralmente.

Sin embargo, dentro de la categoría de escenarios exteriores se engloba una mayor cantidad de ambientes en los que la propagación varía considerablemente entre ellos. Dividiremos las situaciones de este tipo de propagación en tres casos:

- Escenarios por satélite
- Escenarios rurales
- Escenarios urbanos

Satélite

Hasta ahora hemos visto casos en los que la propagación tenía lugar desde una estación base o un transmisor terrestre a otra estación receptora que también se encontraba en la misma situación. Ahora vamos a contemplar el caso en el que el transmisor se encuentra orbitando alrededor de la Tierra y debe cubrir un área de cobertura de la misma.

En comunicaciones por satélite, la señal recibida es normalmente la suma de dos componentes, la señal que procede del trayecto principal y una suma de señales dispersas en el tiempo. La transmisión radio desde un satélite a una estación móvil se ve afectada por la variación de potencia en la señal recibida debido al desvanecimiento, lento debido a los obstáculos y rápido causado por el multitrayecto. Este efecto puede predecirse mediante el empleo de algunos modelos de propagación que veremos a continuación.

En este tipo de comunicaciones vamos a diferenciar tres tipos de modelos de propagación dependiendo de la zona de recepción de la señal:

1) Modelos para zonas extensas

Consideraremos como zonas extensas aquellas de miles de kilómetros cuadrados de extensión. Los modelos que se emplean para los cálculos de propagación en estas áreas cuentan con caracterizaciones del canal radio del satélite basadas en las medidas realizadas con una determinada configuración del trayecto. La predicción de la respuesta al impulso del canal depende de la elevación del satélite, así como de la superficie de recepción.

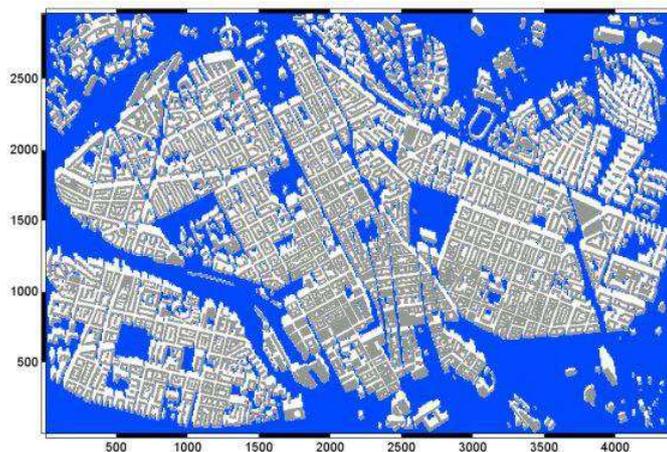


Figura 3.4. Predicción de la señal del satélite basada en un mapa del tipo de terreno [7]

2) Modelos para zonas urbanas

El canal radio móvil en las zonas urbanas está caracterizado por la propagación multitrayecto. Los efectos a tener en cuenta son la reflexión, la difracción y el *shadowing* (ensombrecimiento) producidos por los distintos obstáculos. En los modelos de propagación empleados para este tipo de casos se aproximan estos efectos mediante trazado de rayos ópticos que se apoyan en bases de datos de los edificios de la zona. Los

resultados permiten estimar la potencia de la señal recibida, el estado LOS (Line of sight) o NLOS (Non Line of Sight) y la respuesta al impulso del canal.

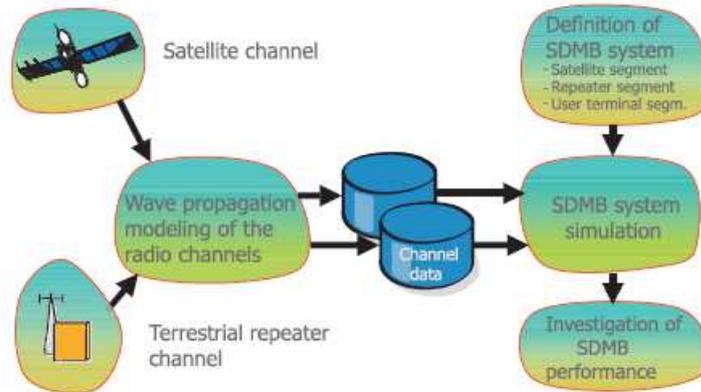


Figura 3.5. Proceso de simulación del modelo para satélite en áreas urbanas [7]

3) Modelos para interiores

El canal de propagación de satélite a interiores ha adquirido una mayor importancia (especialmente en las bandas L y S) debido a que las futuras comunicaciones móviles por satélite y sistemas de difusión y navegación están encaminados a un rendimiento óptimo en todo tipo de entornos. Los escenarios de interiores tienen una especial relevancia debido a lo atractivo de los nuevos servicios MSS por proporcionar una cobertura a todos los entornos.

Los modelos predictivos que se emplean en este caso calculan la penetración de la señal dentro de los edificios y se apoyan en bases de datos con información de los mismos.

Rural

El entorno rural hace referencia a cuando la propagación de las ondas electromagnéticas tiene lugar en zonas con una baja densidad de edificios, y depende principalmente de la topografía y del tipo de terreno. Es por esto que los modelos de propagación empleados para este tipo de escenario deben contener una base de datos detallada del terreno, así como del tipo de elementos (carreteras, ríos, bosque...) que lo conforman.

A continuación vamos a ver dos ejemplos de modelos de propagación para este tipo de entorno:

➤ Modelo de Okumura

Es uno de los modelos de propagación más empleados desde su propuesta, tanto es así que la mayoría del resto de modelos partieron de su base para mejorarlo. Surgió a partir de una serie de medidas en Tokio, mediante las cuales lograron definir un conjunto de curvas que determinaban el nivel medio de atenuación en espacio libre, en función de la frecuencia, la distancia entre el transmisor y el receptor, la altura de las antenas transmisora y receptora y algunos factores de corrección.

Las características de los escenarios donde puede utilizarse este método son:

- Frecuencias de hasta 2000 MHz
- Distancia entre transmisor y receptor en torno a los 100 km
- Altura del receptor entre 3 y 10 m

La pérdida básica de este modelo viene determinada por la fórmula 3.4:

$$PL[dB] = L_0 + A_{mn}(f, d) - G(h_t) - G(h_r) - G_{area} \quad (3.4)$$

Donde:

L_0 : pérdidas en espacio libre a una distancia de referencia

$A_{mn}(f, d)$: factor medio de atenuación. Se estima mediante curvas que dependen de la frecuencia y de la distancia entre el transmisor y el receptor.

$G(h_t) = 20 \log\left(\frac{h_t}{200}\right)$: factor de ganancia de la antena transmisora

$G(h_r) = 10 \log\left(\frac{h_r}{3}\right)$: factor de ganancia de la antena receptora

G_{area} : ganancia de área

➤ *Modelo de Okumura-Hata*

Este modelo de computación creado por Masaharu Hata fue una mejora del propuesto por Yoshihisa Okumura anteriormente, y que simplificaba los cálculos imponiendo la restricción de no poder emplearse para la predicción de áreas con distancias superiores a los 20 km.

La ventaja de este modelo es que únicamente necesita cuatro parámetros para realizar los cálculos, lo que supone un tiempo de computación bastante corto. Sin embargo, no tiene en cuenta el perfil del terreno que hay entre el transmisor y el receptor, debido a que se propuso para los casos en los que el transmisor se encuentra sobre una posición elevada. Tampoco se consideran la reflexión y el *shadowing*.

Los cuatro parámetros empleados son:

1. Frecuencia: desde los 150 hasta los 1500 MHz.
2. Distancia entre el transmisor y el receptor: desde 1 hasta 20 km.
3. Altura de la antena del transmisor: 30 a 200 m.
4. Altura de la antena del receptor: 1 a 10 m.

Como la altura de las antenas se mide desde el suelo donde se colocan, también aparece un parámetro de altura efectiva que relaciona ambas alturas y otorga una mayor precisión al modelo.

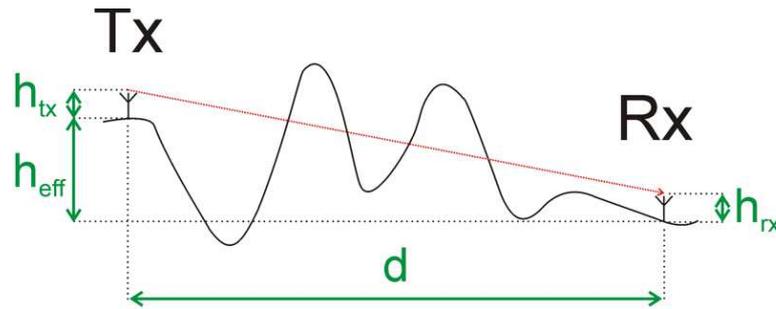


Figura 3.6. Perfil de terreno con los parámetros de Okumura-Hata [7]

La ecuación que modela la pérdida básica es:

$$PL [dB] = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d \quad (3.5)$$

Donde:

h_b : altura de la antena de la estación base

h_m : altura de la antena del móvil

$a(h_m)$ es un factor de corrección en función de la altura del móvil, y si su valor es distinto de 1,5 m se calcula de la siguiente manera:

- Ciudad pequeña o mediana:

$$a(h_m) = (1.1 \log f - 0.7)h_m - (1.56 \log f - 0.8) \quad (3.6)$$

- Ciudad grande:

$$f \leq 200 \text{ MHz} \quad a(h_m) = 8.29 [\log(1.54 h_m)]^2 - 1.1 \quad (3.7)$$

$$f \geq 400 \text{ MHz} \quad a(h_m) = 3.2 [\log(11.75 h_m)]^2 - 4.97 \quad (3.8)$$

Cuando el área donde se aplica el modelo no es urbana, se realiza una corrección del cálculo de la pérdida básica:

- Área suburbana:

$$PL_s [dB] = PL - 2 \log\left(\frac{f}{28}\right)^2 - 5.4 \quad (3.9)$$

- Área abierta:

$$PL_a [dB] = PL - 4.78 \log(f)^2 + 18.33 \log f - 40.94 \quad (3.10)$$

➤ Modelo de la ITU-R P.1546-4

La recomendación ITU-R P.1546-4 [25] propone un método de cálculo de la propagación radioeléctrica punto a zona en la banda de frecuencias de 30 a 3000 MHz. Este modelo está basado en la interpolación/extrapolación de curvas de intensidad de campo resultado de medidas empíricas. Los parámetros que emplea son la frecuencia, la distancia, la altura de las antenas, el porcentaje del tiempo y ubicación, y los datos del terreno y del *clutter*. Cuando los parámetros coinciden con los del modelo de Okumura-Hata los resultados obtenidos son los mismos para ambos modelos.

El rango de aplicación del modelo es:

- Frecuencias entre 30 y 3000 MHz
- Altura efectiva de la antena transmisora inferior o igual a 3000 m
- Altura de la antena receptora superior a 1 m
- Distancia entre el transmisor y el receptor de 1 a 1000 km

Las curvas del modelo empleadas en el estudio [24], según las condiciones descritas previamente son las de la figura 3.7:

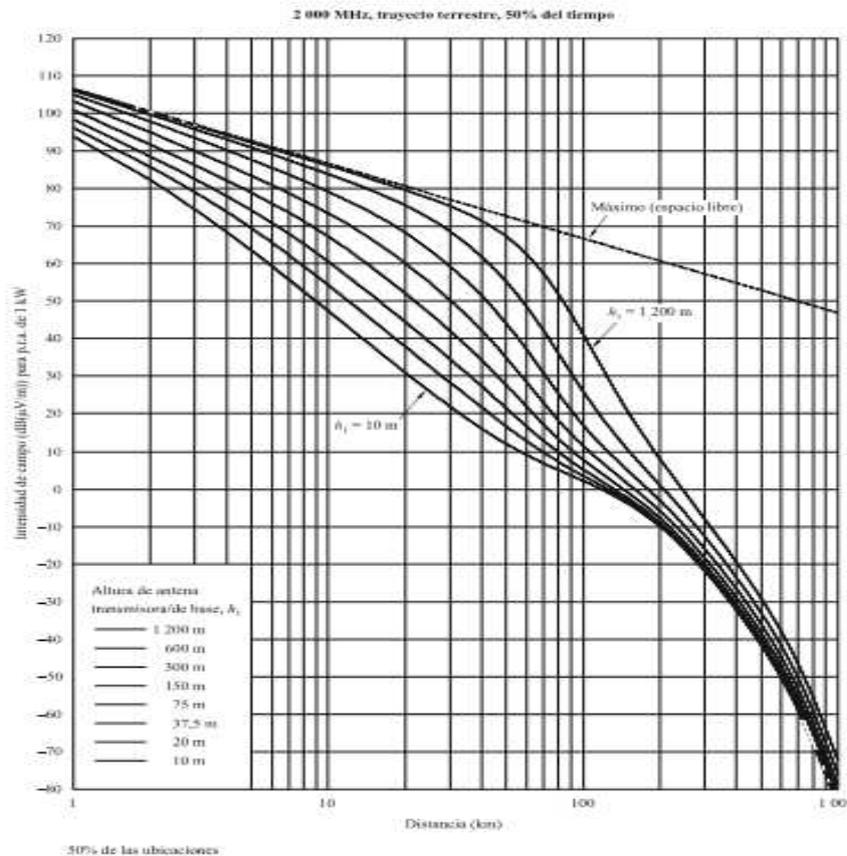


Figura 3.7. Curvas de la recomendación ITU-R P.1546-4 (f=2 GHz) [25]

➤ *Modelo determinista de 2 rayos (Deterministic Two Ray Model – DTR)*

El proceso de cálculo de este modelo consiste en computar mediante algoritmos de rayos ópticos, el rayo directo y el rayo reflejado en el suelo entre el transmisor y el receptor. Si alguno de estos rayos se ve afectado por el ensombrecimiento de algún obstáculo no se tiene en cuenta para el cálculo. Esta es la principal diferencia con el modelo empírico de 2 rayos (ETR) que considera ambos aunque alguno no exista.

La predicción se realiza únicamente en las zonas LOS respecto al transmisor, por lo que en caso de necesitar la simulación fuera de ellas se hace necesario combinarlo con algún otro modelo, como por ejemplo el modelo de difracción por obstáculo afilado.

Las reflexiones serán especulares cuando el ángulo de incidencia sea el mismo que el de reflexión y las características del terreno lo permitan.

El rango de frecuencias para el que se utiliza este modelo va desde los 300 MHz hasta los 300 GHz.

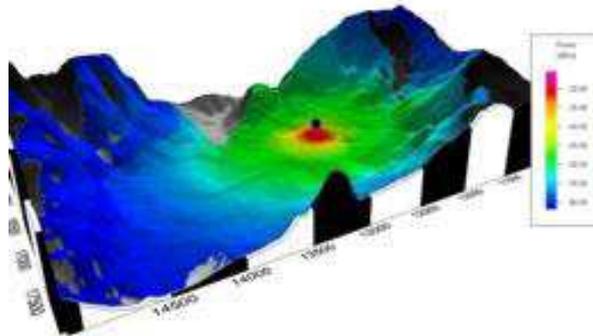


Figura 3.8. Ejemplo de predicción con el modelo determinista de 2 rayos [7]

La figura 3.9 muestra una comparativa entre algunos de los modelos expuestos:

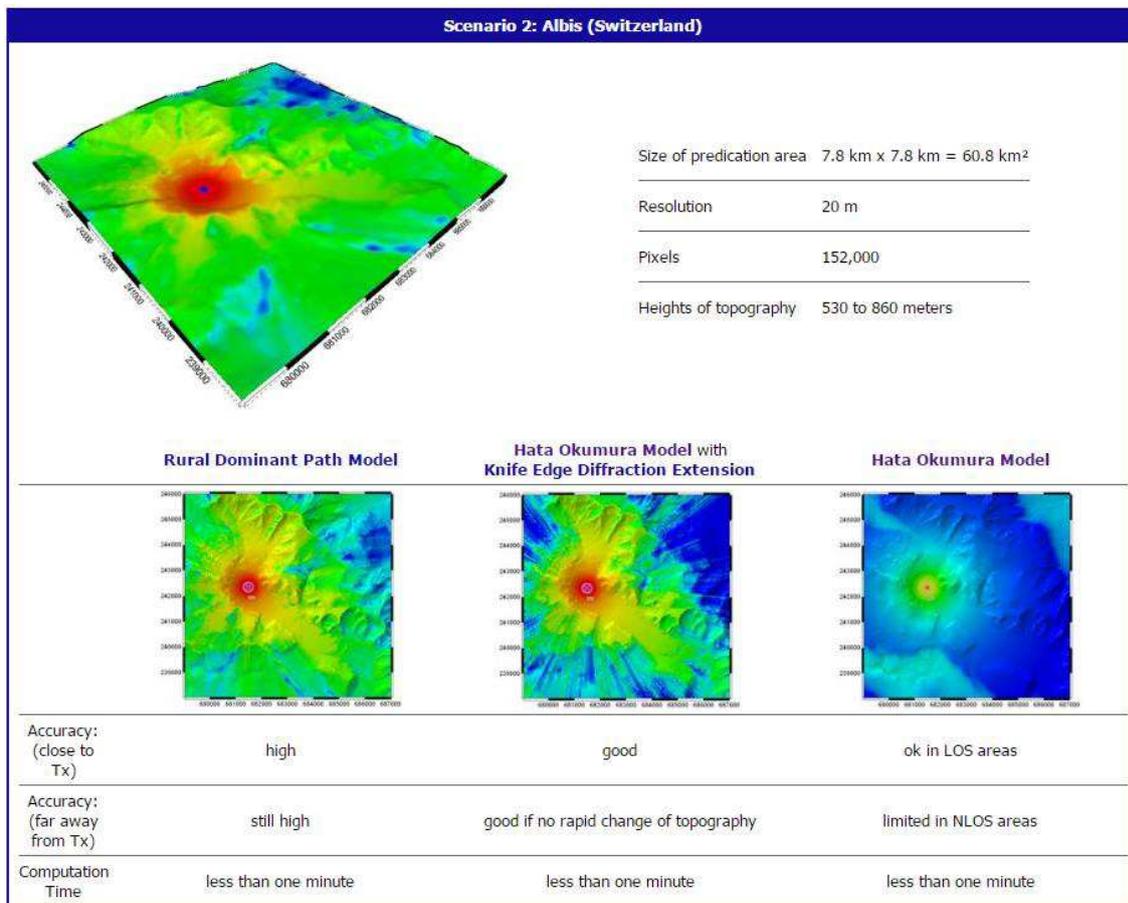


Figura 3.9. Comparación de modelos de predicción rurales [7]

➤ *Modelo Longley Rice*

Se aplica principalmente en terreno irregular y compara las pérdidas respecto a la transmisión en espacio libre. Fue diseñado para frecuencias comprendidas entre los 20 MHz y los 40 GHz, y para distancias entre el kilómetro y los 2000 km. El algoritmo básico fue creado en 1968 por A. G. Longley y P. L. Rice, con el propósito de realizar un estudio de planificación de frecuencia para la transmisión de televisión.

El modelo cuenta con dos modos de predicción, el punto a punto y el de área. La principal diferencia entre ambos modos es la cantidad de datos de entrada requerida. El modo punto a punto precisa conocer el perfil del terreno entre el emisor y el receptor mientras que el modo de predicción por área estima el impacto del terreno mediante métodos semi-empíricos.

El modo punto a punto tiene como parámetros el clima, la curvatura de la Tierra, la conductividad y permitividad de la tierra, etc. El modo del área tiene en cuenta los parámetros anteriores además de la irregularidad del terreno y su variabilidad [7].

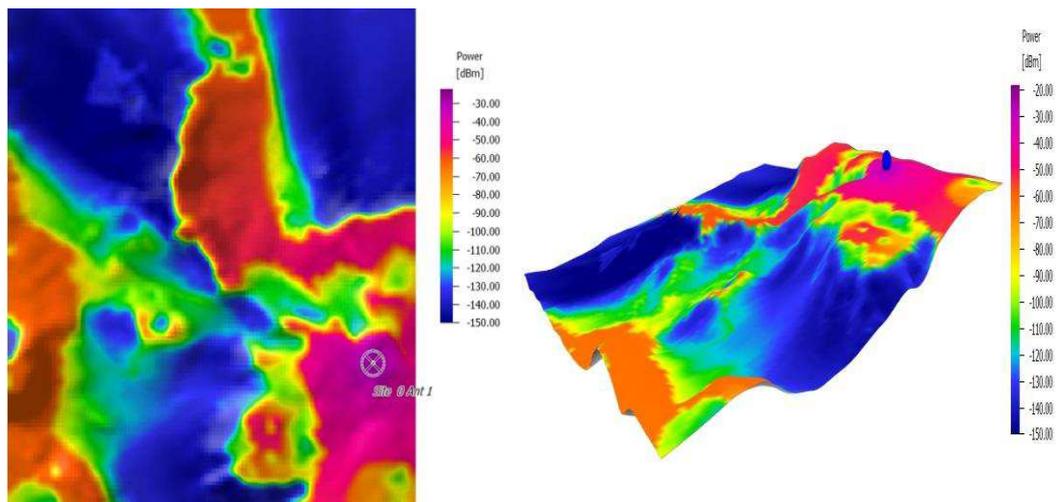


Figura 3.10. Ejemplos de aplicación del modelo Longley-Rice (2D a la izquierda y 3D a la derecha) [7]

Urbano

El escenario urbano es el característico de las ciudades, es decir, lugares con una concentración de edificios significativa. En estos sitios para frecuencias por encima de los 300 MHz, la propagación de las ondas electromagnéticas se ve influenciada por las reflexiones y difracciones en los edificios. Esto hace que sea necesario conocer su disposición y geometría de manera detallada para poder realizar simulaciones, por lo que los modelos necesitan disponer de una base de datos vectorial de los edificios. En el caso de que la frecuencia de las ondas sea menor a los 300 MHz, suelen emplearse los mismos modelos empíricos que describimos en el caso del escenario rural.

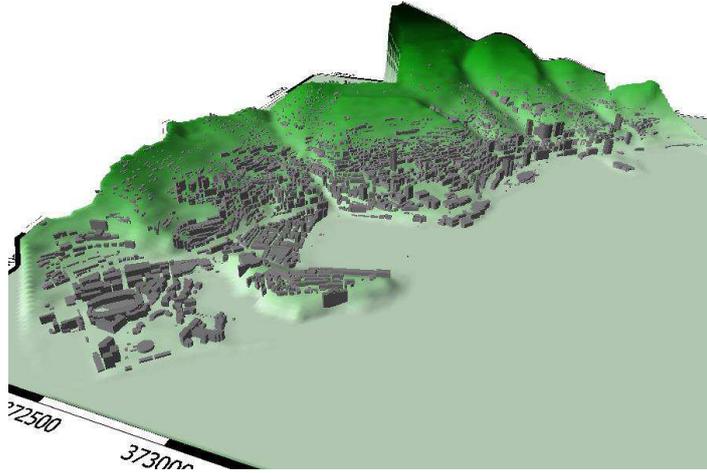


Figura 3.11. Datos vectoriales de Mónaco incluyendo la topografía [7]

También es importante señalar el efecto de la propagación multitrayecto que se acentúa en este tipo de entornos, y que hace que los modelos empíricos no sean válidos para una predicción precisa del nivel de la señal.

Los modelos de propagación urbanos pueden utilizarse tanto para planificación de redes celulares como para análisis LOS (empleados para enlaces microondas). Las antenas transmisoras pueden estar montadas por encima o por debajo de las azoteas de los edificios, en caso de estarlo por debajo darán lugar a microcélulas, que veremos más adelante.

Vamos a nombrar una serie de ejemplos de modelos de propagación que se emplean en escenarios urbanos, algunos de los cuales ya hemos visto anteriormente en otros ambientes, y posteriormente veremos una tabla comparativa de los mismos:

- Modelo Okumura-Hata
- Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami
- Modelo urbano del trayecto dominante
- Modelo de trazado de rayos 3D

La figura 3.12 muestra una comparación de algunos modelos de propagación urbanos de los mencionados previamente:

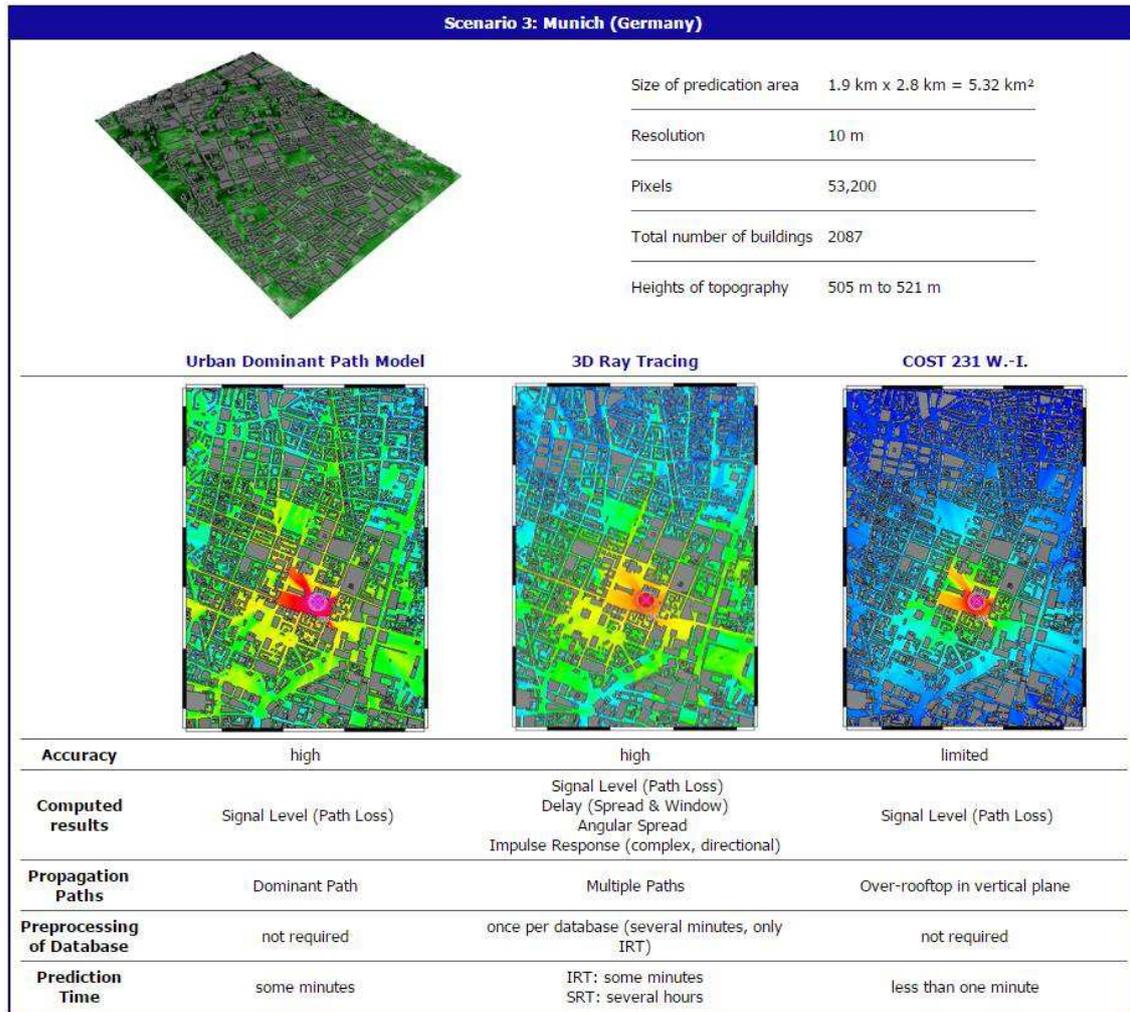


Figura 3.12. Comparación de los modelos de propagación urbanos [7]

Cálculo de la variación temporal

Los escenarios son variantes en el tiempo (los UEs suelen estar en movimiento), se trata de una peculiaridad o característica que puede ocurrir dentro de ellos, por lo que hemos optado por introducirlos de esta manera en la clasificación.

Entendemos por escenarios variantes en el tiempo aquellos cuyas características pueden cambiar con el paso del tiempo. Las comunicaciones inalámbricas en este tipo de ambiente suponen un reto a la hora de predecir su comportamiento. Algunos ejemplos de escenarios de este tipo son:

- Comunicaciones coche a coche (o coche a infraestructura), utilizadas por los sistemas de ayuda a la navegación.
- Mallas y redes de sensores variantes en el tiempo.
- Zonas wifi en estaciones de ferrocarril, aeropuertos o en el centro de las ciudades.
- Estaciones de tren y metro con los trenes en movimiento.
- En los ascensores de dentro de los edificios.

La principal diferencia en planificación de este tipo de escenarios con el resto es que la localización de los transmisores, receptores y los obstáculos es variable (porque pueden estar en movimiento). Esto impacta directamente en la propagación de las ondas y produce una respuesta al impulso del canal variante en el tiempo. En estos casos cobran especial importancia dentro de los resultados los desplazamientos Doppler y la respuesta al impulso del canal direccional.

El software de predicción de esta clase de ambiente permite atribuir movimiento a los elementos que se encuentran dentro de él con el objetivo de simular la mayor cantidad de situaciones que puedan darse dentro del mismo. Como modelos de propagación para este caso, pueden utilizarse los de la predicción para interiores, aunque en el caso de los modelos de trazado de rayos se incorpora uno nuevo que permite añadir el efecto del desplazamiento Doppler a cada rayo simulado.

Los modelos de trazado de rayos 3D calculan la potencia recibida en cada punto teniendo en cuenta las reflexiones y difracciones producidas en todos los obstáculos. Las mejoras que se introducen para los escenarios variantes en el tiempo son principalmente dos:

1. Consideración de la dispersión. Las superficies rugosas como las paredes de los edificios y la superficie de las carreteras producen una dispersión que ha de tenerse muy en cuenta, especialmente en las redes ad-hoc de vehículos. Por esta razón son necesarias medidas de la dispersión que produce cada superficie para que se tenga en cuenta en los algoritmos de predicción y permita obtener unos resultados más precisos.

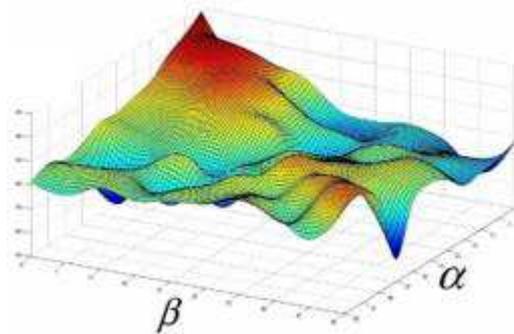


Figura 3.13. Comportamiento Scattering medido en la superficie de una carretera [7]

2. Desplazamiento Doppler. Las reflexiones y difracciones con objetos en movimiento producen un desplazamiento en la frecuencia portadora de la señal (desplazamiento Doppler). Los modelos de predicción tienen en cuenta este comportamiento a la hora de computar los resultados finales.

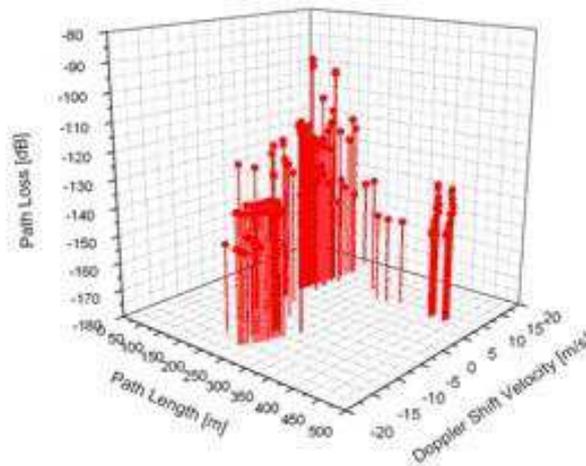


Figura 3.14. Desplazamiento Doppler procesado [7]

Hasta aquí hemos visto la primera de las clasificaciones posibles de modelos de propagación atendiendo al tipo de ambiente en el que se produce, y algunos ejemplos de ellos usados en cada caso hoy en día.

3.3. Clasificación según el área de cobertura

La segunda de las clasificaciones propuestas en este trabajo se basa en la organización de los modelos de propagación según el tamaño del área en la que se realizará el estudio. Un modelo no arrojará resultados con igual precisión si el área en la que se realizan los cálculos es de unas decenas de metros cuadrados, que si se trata de un área de miles de kilómetros cuadrados.

En el punto 2.2. (Historia y evolución de las comunicaciones móviles) señalamos la división de los sistemas de comunicaciones móviles en pequeñas zonas con la aparición del concepto de sistemas celulares. A cada una de estas zonas se la denominó célula o celda y su tamaño depende de la distancia a la que es capaz de proporcionar cobertura la estación base. Según esa distancia podemos clasificarlas de la siguiente forma [8]:

- Células globales: radio superior a los 100 km. Suelen dar cobertura a las zonas de difícil acceso.
- Hipercélulas: distancia comprendida entre 30 y 100 km. Características del medio rural.
- Macrocélulas: radio entre 1,5 y 30 km. Típicas en ciudades pequeñas y vías de comunicación.
- Microcélulas: radios entre 0,1 y 1,5 km. Se emplean en las grandes ciudades. A la agrupación de varias de estas células se la denomina celda de paraguas, y se estructura con el objetivo de disminuir el handover (o traspaso de comunicación entre células contiguas).
- Picocélulas: distancia inferior a los 100 m. Lugares con gran concentración de personas (oficinas, centros comerciales, estadios...).
- Femtocélulas: radio de decenas de metros. Se utilizan en hogares y plantas de oficinas (interiores en general).

La figura 3.15 ilustra esta clasificación:

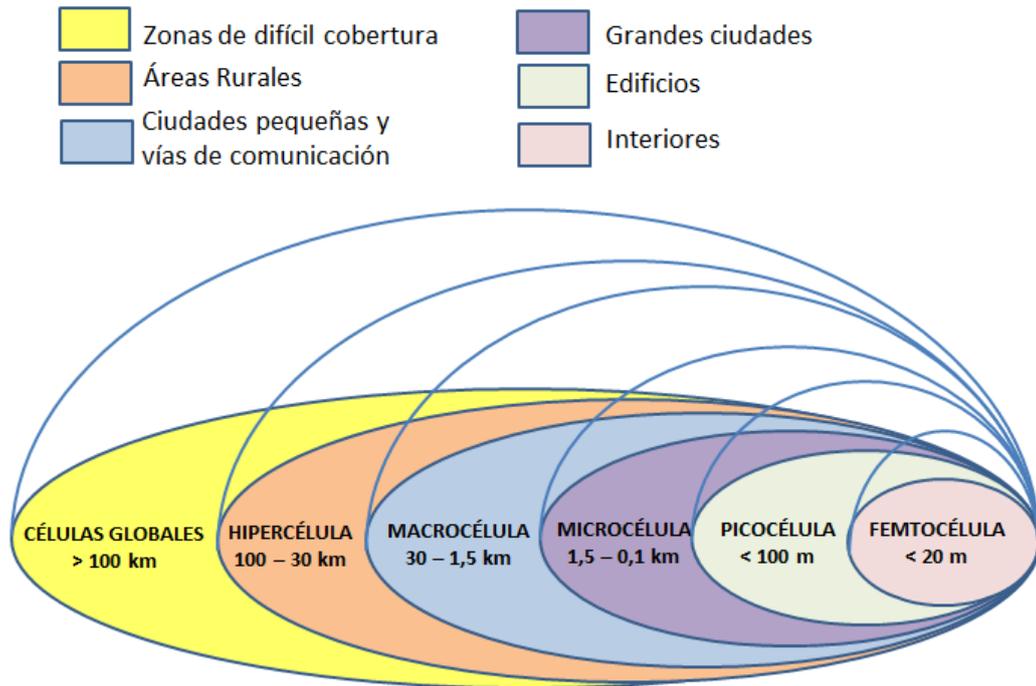


Figura 3.15. Clasificación según el área de cobertura

Una vez definidos los casos que nos podemos encontrar en esta clasificación, vamos a estudiar un poco más en detalle los modelos de propagación que se suelen emplear para la predicción en cada uno de ellos.

3.3.1. Células globales

Las celdas globales son las más grandes en extensión de todas y por lo tanto engloban al resto en su interior. Su área puede comprender miles de kilómetros cuadrados. Son las que proporcionan cobertura a zonas de difícil acceso debido a que a estas no llegan los radios de las células menores porque normalmente no interesa dar servicio.

Son típicas de las comunicaciones por satélite, ya que las antenas que poseen éstos proyectan áreas muy extensas de cobertura sobre la Tierra. Por lo tanto para predecir la propagación en ellas usaremos los modelos que vimos en el apartado 3.2.2.

Los métodos de cálculo requerirán de una base de datos del terreno que proporcione información sobre el tipo de superficie y sobre la topografía de la zona. A partir de ahí se computará mediante algoritmos de modelos empíricos en la banda ancha del canal tierra-móvil-satélite (LMS). Los modelos empíricos requeridos han sido derivados del resultado de campañas de medición en este tipo de entornos.

3.3.2. Hipercélulas

El segundo tipo de celdas que vamos a definir son las hipercélulas. Éstas suelen tener un radio comprendido desde los 30 hasta los 100 km, y son las que soportan la mayoría de las comunicaciones en el medio rural.

Para predecir la propagación en su interior se emplean modelos característicos de este medio, como pueden ser [9]:

- *Modelo de Okumura-Hata* (corrección para área abierta)

$$L_a = LP - 4.78(\log(f_c))^2 - 18.33 \log(f_c) - 40.98 \quad (3.11)$$

Donde:

LP: pérdida básica del modelo (ecuación 3.5)

- *Modelo SUI* (Stanford University Interim)

Fue desarrollado por el grupo 802.16 del IEEE en conjunto con la Universidad de Stanford, con el objetivo de desarrollar un modelo de canal WiMAX para entornos suburbanos. Según el IEEE 802.16 este modelo es adecuado para sistemas WIMAX y BFWA (Broadband Fixed Wireless Applications). Este modelo divide los escenarios de propagación en tres tipos:

- 1) Categoría A: terreno montañoso con niveles medios y altos de vegetación, que corresponde a condiciones de pérdidas elevadas.
- 2) Categoría B: terreno montañoso con niveles bajos de vegetación, o zonas llanas con niveles medios y altos de vegetación. Pérdidas de nivel medio.
- 3) Categoría C: terreno llano con densidad de vegetación baja. Pérdidas bajas.

En todos los escenarios suelen darse normalmente las condiciones siguientes:

- Frecuencias superiores a los 1900 MHz
- Tamaño de las celdas inferior a 10 km
- Altura de la antena del receptor entre 2 y 10 m
- Altura de la antena de la estación base entre 15 y 40 m
- Requisito de porcentaje de cobertura elevado (80% - 90%)

La ecuación que determina la pérdida básica de propagación resulta:

$$PL[dB] = L_0 + 10 \gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_f + \chi_h + s \quad (3.12)$$

Donde:

L_0 : pérdida en espacio libre a la distancia de referencia d_0

d : distancia entre el transmisor y el receptor

Factor de corrección de frecuencia: $\chi_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right)$ (3.13)

χ_h : factor de corrección de altura de la estación base

$$\chi_h = -10.8 \log\left(\frac{h_b}{2000}\right) \text{ (Categorías A y B)} \quad (3.14)$$

$$\chi_h = -20 \log\left(\frac{h_b}{2000}\right) \text{ (Categoría C)} \quad (3.15)$$

Ensombrecimiento:

$$S = 0.65 (\log f)^2 - 1.3 \log(f) + \alpha \quad (3.16)$$

$$\alpha = 5.2 \text{ dB (Categorías A y B)}$$

$$\alpha = 6.6 \text{ dB (Categoría C)}$$

$$\text{Exponente de pérdidas: } \gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (3.17)$$

Parámetros	Categoría A	Categoría B	Categoría C
a	4.6	4	3.6
b (1/m)	0.0075	0.0065	0.005
c (m)	12.6	17.1	20

Tabla 3.1. Parámetros por categoría de terreno del modelo SUI

➤ *Modelo de Ericsson 9999*

Modelo implementado por Ericsson como una extensión del modelo Hata. Este método de cálculo permite hacer ajustes en algunos parámetros en función del tipo de escenario en el que nos encontremos.

La pérdida básica obedece a la ecuación:

$$PL = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log h_b + a_3 \log(h_b) \log(d) - 3.2(\log(11.75))^2 + g(f) \quad (3.18)$$

Donde:

$$g(f) = 44.49 \log(f) - 4.78(\log(f))^2 \quad (3.19)$$

a_0, a_1, a_2 y a_3 son constantes que dependen del tipo de escenario, sus valores por defecto son:

a_0	a_1	a_2	a_3
36.2	30.2	12	0.1

Tabla 3.2. Valores por defecto de los parámetros del modelo Ericsson 9999

Las ecuaciones anteriores pertenecen a modelos teóricos que permiten realizar los cálculos de forma rápida y precisa gracias a las correcciones que se tienen en cuenta en cada caso para terrenos rurales.

3.3.3. Macrocelulas

El radio del siguiente tipo de celdas que vamos a analizar puede ir desde un kilómetro hasta los 30. Las macrocelulas son comunes en entornos urbanos. Las estaciones base suelen instalarse en las azoteas de los edificios por lo que el trayecto de propagación se ve afectado principalmente por ellas.

Los modelos de predicción que se emplean para calcular las pérdidas en este tipo de celdas son, por lo tanto, los mismos que vimos en el punto 3.2.2 para entornos urbanos. Como ejemplo distinto a los expuestos anteriormente vamos a exponer un caso práctico real en Nigeria en el que se emplea el modelo de Egli y, posteriormente, se comparan los resultados con los arrojados por el modelo de Okumura-Hata [10]:

➤ *Modelo de Egli*

Este modelo predice la propagación en enlaces punto a punto (LOS) y se suele utilizar para casos en los que una de las antenas está fija (normalmente la transmisora) y la otra es móvil. Normalmente su aplicación se produce en medios irregulares siempre y cuando no haya obstáculos naturales en medio del enlace. Su expresión es:

$$PL[dB] = G_b G_m \left(\frac{h_b h_m}{d^2} \right)^2 \left(\frac{40}{f} \right)^2 \quad (3.20)$$

Donde:

G_b : ganancia de la antena de la estación base

G_m : ganancia de la antena de la estación móvil

h_b : altura de la estación base

h_m : altura de la estación móvil

La aplicación de la ecuación en un ejemplo de un sistema celular de 900 MHz situado en un medio urbano, con una estación base a una altura de 100 m y una estación móvil en un vehículo con una antena de 2 m, devuelve el resultado recogido en la tabla 3.3:

Distancia (km)	Modelo Egli (dB)	Modelo Hata (dB)	Medidas obtenidas(dB)
1	101.02	117.9	125.71
2	113.06	127.48	132.50
3	120.11	133.07	136.63
4	125.11	137.05	140.02
5	128.98	140.13	145.81

Tabla 3.3. Resultados numéricos del ejemplo

En la tabla 3.3 podemos observar que el Modelo Hata es más pesimista que el de Egli en cuanto a las pérdidas del enlace. Sin embargo su predicción se aproxima más a las medidas obtenidas en el entorno real, por lo que podemos concluir con que es más adecuado para macroceldas.

3.3.4. Microcélulas

Las microcélulas cuentan con radios que pueden ir desde la centena de metros hasta el kilómetro. Principalmente se encuentran en entornos urbanos y su característica principal es que la estación base suele estar situada por debajo de la media de altura de los edificios que la rodean.

La propagación en ciudades está sujeta al efecto del multitrayecto, por lo que un punto crítico del estudio será conocer todos los posibles trayectos de las ondas que vendrán determinados por la altura de la estación base respecto a los edificios que la rodean. La aplicación de los modelos de propagación suele limitarse a áreas urbanas planas, no siendo útil en casos con presencia de abundante vegetación urbana, como los parques por ejemplo.

En estos entornos podemos diferenciar la propagación en dos tipos para los cuales hay modelos más indicados que otros, estas son la propagación que tiene lugar por debajo de las azoteas de los edificios y la que tiene lugar por encima. A continuación veremos unos ejemplos de modelos que se emplean en cada uno de estos casos [11]:

Propagación por encima de las azoteas de los edificios

➤ Modelo Cost 231 Walfisch Ikegami

Modelo empírico combinación de los modelos de J.Walfisch y F. Ikegami y mejorado por el proyecto COST 231. Considera los edificios en el plano vertical entre el transmisor y el receptor. También tiene en cuenta la anchura de las calles, la altura de los edificios así como la altura de las antenas.

Como modelo de predicción cuenta con una gran precisión cuando la propagación por encima de los edificios es dominante, por el contrario, no es tan preciso cuando el factor dominante es el de la reflexión múltiple producida en las calles.

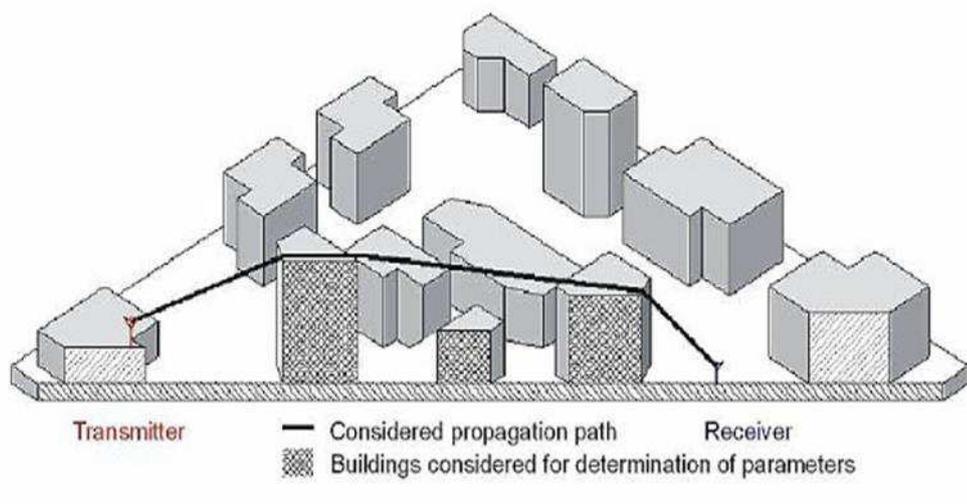


Figura 3.16. Escenario de propagación del modelo COST 231 W-I [7]

El modelo COST 231 Walfisch-Ikegami es una extensión del modelo COST Hata y puede aplicarse bajo las condiciones siguientes:

- Frecuencias entre los 800 y los 2000 MHz
- Altura de la estación transmisora de 4 a 50 m

- Altura del móvil receptor de 1 a 3 m
- Distancia entre el transmisor y el receptor entre 0.02 y 50 km
- Altura relativa del transmisor respecto a los edificios mayor que 0

Cuando el transmisor y el receptor están en situación LOS la pérdida básica viene determinada por la ecuación 3.21:

$$PL [dB] = 42.64 + 26 \log d + 20 \log f \quad (3.21)$$

Mientras que si se encuentran en situación NLOS la fórmula queda:

$$PL [dB] = L_0 + L_{RTS} + L_{MSD} \quad (3.22)$$

Donde:

$$\text{Atenuación en espacio libre: } L_0 = 32.45 + 20 \log d + 20 \log f \quad (3.23)$$

Difracción desde la azotea a la calle:

$$L_{RTS} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log(h_b - h_m) + L_{ori} \quad (3.24)$$

φ : ángulo que forma la orientación de la antena con la calle (en grados)

$$0 < \varphi < 35 \quad L_{ori} = -10 + 0.354\varphi \quad (3.25)$$

$$35 < \varphi < 55 \quad L_{ori} = 2.5 + 0.075(\varphi - 35) \quad (3.26)$$

$$55 < \varphi < 90 \quad L_{ori} = 4 - 0.114(\varphi - 55) \quad (3.27)$$

Difracción debida a múltiples obstáculos:

$$L_{MSD} = L_{BSH} + k_A + k_D \log d + k_F \log f - 9 \log b \quad (3.28)$$

$$k_D = 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_m} \quad (3.29)$$

$$k_F = -4 + k \left(\frac{f}{924} \right) \quad (k = 0.7 \text{ para suburbano y } k = 1.5 \text{ para urbano}) \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} h_b > h_r \quad L_{BSH} &= -18 \log(1 + \Delta h_b) \quad (3.31) \\ k_A &= 54 \\ k_D &= 18 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_b \leq h_r \quad L_{BSH} &= 0 \\ k_A &= 54 - 0.8 \Delta h_b \quad \text{si } d \geq 0.5 \text{ km} \quad (3.32) \end{aligned}$$

$$k_A = 54 - \frac{0.8 \Delta h_b d}{0.5} \quad \text{si } d < 0.5 \text{ km} \quad (3.33)$$

➤ *Modelo CSELT*

Basado en la aproximación de Walfisch-Bertoni y mejorado con la consideración de las alturas de los edificios en el plano vertical. Trata los obstáculos (edificios) como superficies perfectamente absorbentes, infinitamente estrechas en la dirección de propagación e infinitamente anchas en la dirección perpendicular. Para las estaciones base situadas muy por encima de la media de la altura de los edificios, se asume que la difracción de la azotea a la calle producida en el último obstáculo es el efecto dominante en las pérdidas del enlace.

Propagación por debajo de las azoteas de los edificios

➤ *Modelo de Ericsson para microcélulas*

Se trata de un método matemático de predicción de pérdidas muy eficiente en cuanto al tiempo computacional. El cálculo se realiza trazando trayectos por las distintas calles. La aproximación del modelo se basa en la expresión de pérdidas del camino entre dos antenas isotrópicas, donde la distancia real entre ellas se modifica por una imaginaria que se calcula teniendo en cuenta puntos nodales de la transmisión así como los ángulos que forman las calles por donde pasan los rayos. Si la propagación fuese NLOS se pueden introducir consideraciones del modelo Walfisch Ikegami.

➤ *Modelo Telekom para microcélulas*

Para el cálculo de las pérdidas del camino emplea una configuración geométrica estándar de red de calles conectadas mediante cruces. Utiliza un conjunto limitado de parámetros y simplificaciones y aproximaciones empíricas. Contempla tres tipos de categorías de propagación: LOS, NLOS a una calle perpendicular y NLOS a una calle paralela. La aplicación de este modelo tiene lugar principalmente en áreas urbanas densas.

3.3.5. Picocélulas

El siguiente tipo de célula que vamos a definir se trata de la picocélula. Su radio no supera la centena de metros y suelen situarse en edificios con gran concentración de personas (estaciones de tren, edificios de oficinas, aeropuertos, etc.).

Uno de los usos más importantes de estas celdas es para redes locales (WLAN) ya que requieren elevadas tasas de tráfico. La propagación dentro de ellas es relevante para determinar la penetración que producen en los edificios sistemas macro o microcelulares, así como las interferencias que pudiesen ocasionar [6].

A continuación vamos a ver algunos modelos de propagación cuyo empleo es común en este tipo de células:

➤ *Modelo de Ericsson Indoor*

Diseñado para frecuencias en torno a los 900 MHz. El trayecto de pérdidas se considera una variable aleatoria, uniformemente distribuida entre límites que varían con la distancia como se indica en la Tabla 3.4. El exponente de pérdidas del camino crece desde 2 hasta 12 mientras lo hace la distancia, lo que indica una disminución de la potencia de la señal muy fuerte con la distancia.

Distancia [m]	Límite inferior de pérdidas [dB]	Límite superior de pérdidas [dB]
$1 < r < 10$	$30 + 20 \log r$	$30 + 40 \log r$
$10 < r < 20$	$20 + 30 \log r$	$40 + 30 \log r$
$20 \leq r < 40$	$-19 + 60 \log r$	$1 + 60 \log r$
$40 \leq r$	$-115 + 120 \log r$	$-95 + 120 \log r$

Tabla 3.4. Modelo de Ericsson Indoor [6]

➤ *Modelo de trazado de rayos*

Los modelos basados en las técnicas de lanzamiento de rayos, parten de trazar una serie de rayos desde el transmisor en un número discreto de ángulos. Los rayos actúan sobre los objetos presentes en el entorno al propagarse, bien sea mediante reflexión o difracción. La propagación de cada rayo termina cuando su potencia cae por debajo de un umbral determinado.

Este modelo puede emplearse tanto para el caso de dos dimensiones como para el de tres, para obtener el perfil del retardo de potencia y del azimut, los ángulos de salida y llegada y la predicción de la cobertura.

3.3.6. Femtocélulas

El último tipo de célula que vamos a ver es la femtocélula. Su radio no suele superar la decena de metros, puesto que se trata de una estación base celular de baja potencia, cuyo uso se limita a hogares o pequeños negocios. El motivo por el que se emplea este tipo de células es el de proporcionar una mejor cobertura en interiores donde apenas llegaría señal de otra forma. Esta situación interesa tanto al operador móvil como al consumidor, ya que al operador le permite proporcionar cobertura en zonas interiores donde no había, y al consumidor debido a que posee una estación base muy próxima lo que se traduce en elevadas tasas de tráfico y mayor exclusividad de atención.

En cuanto a los modelos de predicción de pérdidas que se emplean para este tipo de celdas, únicamente señalar el hecho de que al tratarse de escenarios *indoor* pueden utilizarse los modelos de propagación para interiores ya vistos en el punto 3.2.1. así como los indicados en el apartado anterior para picocélulas.

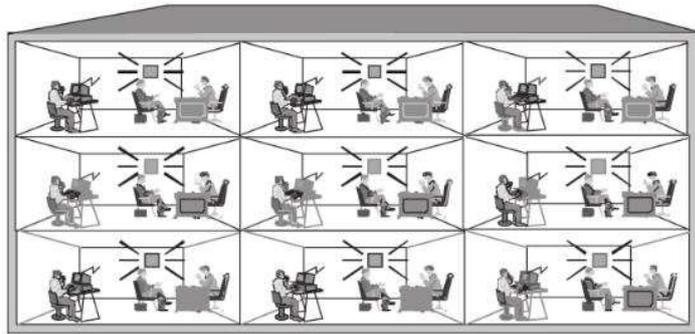


Figura 3.17. Femtocélulas [6]

3.4. Clasificación según el origen de los datos

La última clasificación que vamos a ver es, en general, la más empleada en artículos que tratan este tema. La ordenación que realiza de los modelos de propagación atiende al origen de los datos. Desde un punto de vista teórico es la más objetiva de todas, puesto que los modelos van a dividirse teniendo en cuenta únicamente sus características analíticas y sin depender de factores externos como el área de utilización, mientras que en las clasificaciones previas podía darse el caso en que algún modelo pudiese estar dentro de dos grupos distintos, debido a que en ciertos casos las fronteras de separación son algo difusas.

Diferenciaremos tres tipos de modelos de predicción de pérdidas en este caso, los modelos empíricos, los modelos deterministas y una combinación de ambos, los modelos semi-empíricos. Cuando el modelo de propagación esté basado en leyes experimentales nos hallaremos ante el caso de un modelo empírico. Si por el contrario el modelo se basa en leyes físicas será un modelo determinista, y si además cuenta con factores de corrección empíricos se tratará de una mezcla de los dos anteriores, un modelo semi-empírico. La figura 3.18 ilustra esta clasificación:

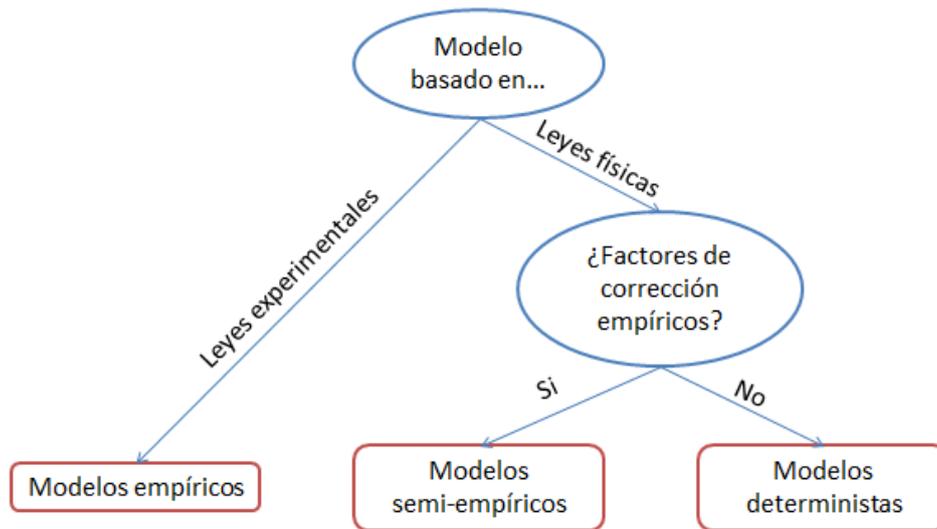


Figura 3.18. Clasificación de los modelos según el origen de los datos

A continuación pasaremos a explicar cada uno de estos grupos, listando algunos modelos como ejemplos dentro de ellos.

3.4.1. Modelos empíricos

El método empírico es aquel que se basa en la observación directa o indirecta de algún fenómeno y, a partir de ahí, analiza los datos obtenidos cualitativa y cuantitativamente. Por lo tanto, la formulación de modelos empíricos surge de la toma de medidas y posterior análisis de las mismas en distintos escenarios.

Normalmente este tipo de modelos sigue una ley proporcional al logaritmo de la distancia entre el transmisor y el receptor, y suele aplicarse en macroceldas, microceldas y picoceldas. La precisión de cada uno de los modelos suele depender de la desviación típica de la variable aleatoria log normal.

Sus características principales son:

- Basados en medidas realizadas
- Modelos simples (pocos parámetros)
- Empleo de propiedades estadísticas
- No son demasiado precisos
- Rápidos a la hora de realizar los cálculos

Algunos ejemplos de modelos de este tipo son:

- *Modelo de pendiente de pérdidas con la distancia*

$$PL[dB] = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_0 \quad (3.34)$$

Donde:

n: pendiente de pérdidas

L_0 : pérdidas en espacio libre a una distancia de referencia

χ_0 : variable aleatoria con distribución log normal

➤ *Modelo de Okumura-Hata*

(Ver punto 3.2.2)

➤ *Modelo COST Hata*

A este modelo también se le conoce como el modelo COST Hata. Es el modelo más empleado cuando la frecuencia está por encima del umbral del modelo anterior debido a la precisión de los resultados. Se trata de una extensión del modelo de Okumura-Hata visto anteriormente.

Las condiciones en las que se puede emplear son:

- Frecuencias entre 1500 y 2000 MHz
- Altura del UE entre 1 y 10 m
- Altura de la estación base entre los 30 y los 200 m
- Distancia del enlace de 1 a 20 km

La pérdida básica resulta de la ecuación:

$$PL [dB] = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d + C \quad (3.35)$$

Donde:

h_b : altura de la estación base

h_m : altura del móvil

$a(h_m)$: factor de corrección de altura del móvil

$$\text{Zona urbana: } a(h_m) = 3.2(\log(11.75 h_m))^2 - 4.97 \quad (3.36)$$

$$\text{Zona rural y suburbana: } a(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7) h_m - (1.56f - 0.8) \quad (3.37)$$

C = 3 dB para áreas urbanas

➤ *Modelo de Lee*

$$L [dB] = L_0 + n \cdot \log d - 10(\log F_A - 2 \log(\frac{H_{ET}}{30})) \quad (3.38)$$

Donde:

L_0 : Pérdida de referencia

n: pendiente de pérdidas

F_A : factor de ajuste

$$F_A = F_{BH} F_{BG} F_{MH} F_{MG} F_F \quad (3.39)$$

Donde:

F_{BH} : factor de corrección de altura de la antena de la estación base

$$F_{BH} = \left(\frac{h_b}{30.48} \right)^2 \quad (3.40)$$

h_b : altura de la antena de la estación base

F_{BG} : factor de corrección de ganancia de la antena de la estación base

$$F_{BG} = \frac{G_B}{4} \quad (3.41)$$

G_B : ganancia de la antena de la estación base

F_{MH} : factor de corrección de altura de la antena de la estación móvil

$$F_{MH} = \frac{h_m}{3} \quad (\text{si } h_m > 3) \quad (3.42)$$

$$F_{MH} = \left(\frac{h_m}{3} \right)^2 \quad (\text{si } h_m \leq 3) \quad (3.43)$$

h_m : altura de la antena de la estación móvil

F_{MG} : factor de corrección de ganancia de la antena de la estación móvil

$$F_{MG} = G_M \quad (3.44)$$

G_M : ganancia de la antena de la estación móvil

F_F : factor de corrección de frecuencia

$$F_{MG} = \left(\frac{f}{900} \right)^{-n} \quad (\text{con } 2 < n < 3) \quad (3.45)$$

H_{ET} : altura efectiva del terreno

➤ *Modelo de dos pendientes y punto de ruptura*

Se establece un punto de ruptura (X_p) entre dos pendientes de pérdidas distintas.

$$X_p = \frac{2\pi h_b h_m}{\lambda} \quad (3.46)$$

$$d \leq X_p: \quad L_{dB} = L_0 + 10 \cdot n_1 \cdot \log d \quad (3.47)$$

$$d > X_p: \quad L_{dB} = L_0 + 10 \cdot n_1 \cdot \log X_p + 10 \cdot n_2 (\log d - \log X_p) \quad (3.48)$$

Donde:

n_1 : pendiente de pérdidas antes del punto de ruptura

n_2 : pendiente de pérdidas después del punto de ruptura

➤ *Modelo Multi-Wall COST 231*

(Ver punto 3.2.1)

3.4.2. Modelos deterministas

Un modelo determinista es aquel en el que las mismas entradas originan siempre las mismas salidas, sin que pueda tener lugar el principio de incertidumbre. Los modelos de propagación deterministas permiten obtener resultados más precisos que los empíricos, con la desventaja de aumentar la carga computacional requerida. Sus simulaciones precisan de la información geométrica del terreno dónde se va a efectuar el análisis para poder determinar la trayectoria que seguirán las ondas, introduciendo reflexiones y difracciones en su propagación.

Para trazar la propagación de las ondas por el escenario, estos modelos emplean técnicas de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), técnicas de óptica geométrica (GO) y la teoría uniforme de la difracción (UTD).

La óptica geométrica está basada en las leyes de Snell sobre los efectos de las ondas en un medio separador (incidencia, reflexión y transmisión). Los simuladores la emplean para determinar el trayecto que seguirá cada rayo tras una colisión con un objeto.

La teoría uniforme de la difracción obtiene una expresión en la que los coeficientes de difracción de Keller aparecen multiplicados por una integral de Fresnel, que vale cero en la dirección de reflexión especular y se aproxima a uno al alejarse de ella, evitando así el problema debido a las direcciones de observación singulares que aparecen al analizar una estructura complicada [12]. La aplicación de esta teoría tiene lugar en la difracción producida en los bordes de los objetos.

El método de diferencias finitas en el dominio del tiempo se emplea en simulación con el objetivo de dar solución a las ecuaciones de Maxwell en la propagación de las ondas. Es un método relativamente sencillo de implementar a nivel computacional y sus cálculos son precisos.

Los programas de simulación determinan el camino de los rayos siguiendo dos estrategias distintas, el trazado de rayos (RTM) y el lanzamiento de rayos (RLM) [3]:

- a) Trazado de rayos: esta técnica genera unas imágenes de la antenna transmisora por cada superficie del entorno. Una vez generadas, consiste en trazar todos los rayos desde el receptor hacia las imágenes del transmisor, y cuando se intercepte el obstáculo hacia el transmisor real. El software de este tipo permite fijar un número máximo de reflexiones, ya que por cada una aumenta el número de operaciones exponencialmente.

Los programas que utilizan esta estrategia precisan de una gran cantidad de recursos, por lo que han surgido ciertas optimizaciones para estos algoritmos que se denominan trazado de rayos inteligente, y están basadas en un pre-procesamiento de los datos.

- b) Lanzamiento de rayos: a diferencia de la estrategia anterior, los rayos parten desde el transmisor cada cierto ángulo fijo. Cada rayo interceptado por un obstáculo se divide en uno transmitido y en otro reflejado, y así sucesivamente hasta que la potencia del rayo queda por debajo de un umbral determinado a partir del cual ya no se tiene en cuenta. Cuando un rayo pasa a cierta distancia del receptor se computa como una contribución a la señal.

Resumiendo lo visto en este punto, las características más importantes de este tipo de modelos son:

- Aplicación en lugares específicos
- Modelos muy precisos
- Elevada carga computacional
- Requieren bases de datos del terreno para efectuar sus cálculos
- Empleo de óptica geométrica y trazado de rayos

Algunos ejemplos de modelos de predicción de pérdidas de este grupo son:

➤ *Modelo de dos rayos*

Emplea óptica geométrica y tiene en cuenta únicamente dos caminos (de ahí su nombre), el rayo directo desde el transmisor al receptor y la componente reflejada en la tierra entre ambos.

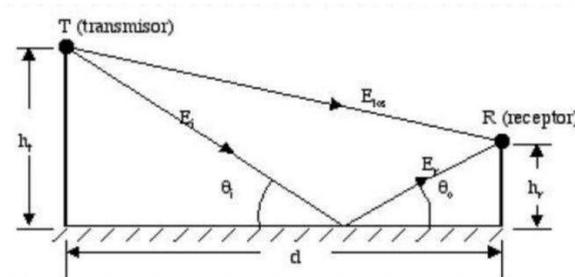


Figura 3.19. Modelo de dos rayos

➤ *3D Standard Ray Tracing*

(Ver punto 3.2.1)

➤ *3D Intelligent Ray Tracing*

(Ver punto 3.2.1)

3.4.3. Modelos semi-empíricos

En este apartado vamos a ver el último tipo de esta clasificación, los denominados semi-empíricos. Estos modelos son una combinación de los dos expuestos anteriormente. Al igual que los deterministas su base es analítica, pero además incorporan factores de corrección empíricos procedentes de estudios previos.

Algunos ejemplos de modelos que se encuentran dentro de esta clasificación son:

➤ *Modelo de Egli*

(Ver punto 3.3.3)

➤ *Modelo COST 231-Walfisch-Ikegami*

Este modelo fue introducido en el punto 3.3.4 (Modelos para microcélulas). Los parámetros con los que se efectúan los cálculos pueden estar comprendidos entre los siguientes valores:

- Frecuencia: 800 a 2000 MHz
- Altura del transmisor (h_{TX}): 4 a 50 m
- Altura del receptor (h_{RX}): 1 a 3 m
- Distancia entre el transmisor y el receptor: 20 a 5000 m
- Valor medio de las alturas de los edificios (h_{ROOF})
- Valor medio de las anchuras de las calles (w)
- Valor medio de la separación entre edificios (b)

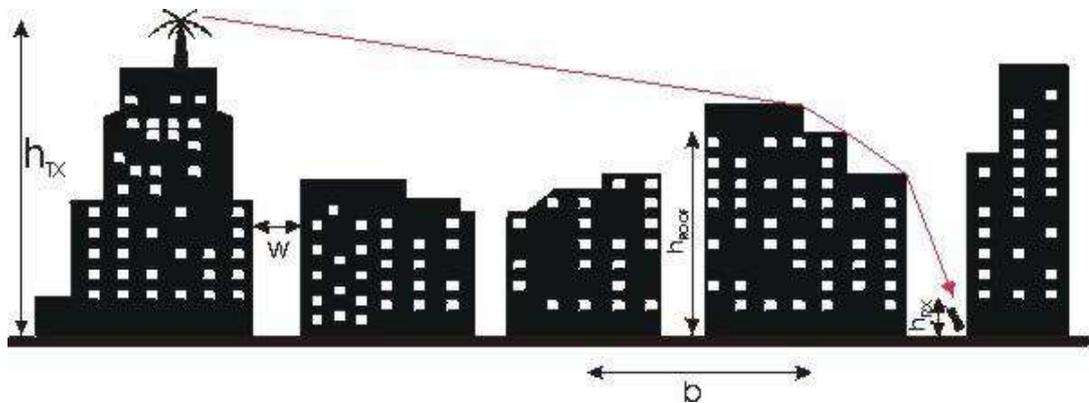


Figura 3.20. Modelo COST 231-Walfisch-Ikegami [7]

➤ *Modelo Longley-Rice*

(Ver punto 3.2.2)

4. Modelos de propagación para comunicaciones móviles 4G

4.1. Introducción

En este apartado vamos a centrarnos en la caracterización del canal y en la exposición de modelos de propagación para dos estándares que recoge el IMT-Advanced como tecnología 4G, LTE (Long Term Evolution) y su evolución LTE-Advanced. Ambos estándares fueron propuestos por el *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) y a día de hoy son los más comercializados como tecnología 4G en nuestro país.

Como ya comentamos en el apartado 2.2.5 (Cuarta generación) aunque LTE no cumple con las especificaciones del IMT-Advanced para el 4G, se trata de una mejora de 3G y dispone de una arquitectura propia, por lo que fue incluida dentro de las tecnologías de cuarta generación de móviles. A partir de ahí, su posterior versión LTE-Advanced sí que cumple con las especificaciones propias del 4G. En España esta nueva tecnología se comercializa con el nombre de 4G plus (4G+).

La estructura que seguiremos en este apartado será la de introducir brevemente cada una de las tecnologías, seguidamente expondremos la caracterización del canal de propagación en cada caso, y por último recopilaremos algunos de los modelos más utilizados con estudios comparativos y simulaciones.



Figura 4.1. Integrantes del 3GPP

4.2. Conceptos básicos sobre LTE

Long Term Evolution (LTE) es un estándar de comunicaciones móviles de transmisión de datos de alta velocidad. Fue desarrollado por el 3GPP en su *release 8*, y ha logrado asentarse y servir como base a las posteriores versiones. Está considerado como la continuación de los estándares 3G, bien sea como una generación de transición hasta la cuarta generación (3.9G) o ya incluida dentro de la misma (4G).

Las circunstancias que motivaron su aparición fueron:

- La necesidad de asegurar la continuidad de la competitividad del sistema 3G en el futuro
- La demanda por parte del usuario de mayor velocidad de transmisión de datos y una mejora de la calidad del servicio

- La optimización del sistema de conmutación de paquetes
- La continua demanda de la reducción del coste (CAPEX y OPEX)
- Disminución de complejidad de los sistemas
- Evitar la fragmentación de las tecnologías innecesaria para las operaciones en banda

A la parte de acceso al *Evolved Packet System* (EPS) se la denomina E-UTRAN y sus requerimientos principales son una eficiencia espectral alta, velocidades de pico elevadas, tiempo de envío y recepción corto y flexibilidad en frecuencia y ancho de banda.

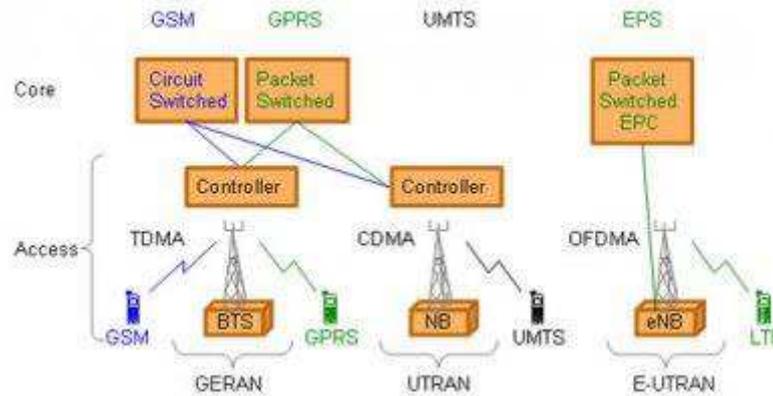


Figura 4.2. Soluciones de red desde GSM (2G) a LTE (4G) [13]

El sistema EPS está basado en la conmutación de paquetes IP. Tanto los servicios en tiempo real como los de datos son atendidos por el protocolo IP. La dirección IP se asigna al encender el móvil y se libera cuando se apaga. La nueva solución de acceso está basada en OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) en combinación con modulaciones de elevado orden (hasta 64 QAM), grandes anchos de banda (hasta 20 MHz) y multiplexado espacial en el *downlink* (hasta 4x4), que permiten alcanzar elevadas tasas de datos. En teoría, la máxima tasa de datos en el canal de transporte es de 75 Mbps en el *uplink* y de 300 Mbps en el *downlink*, empleando multiplexado espacial.

La red de acceso LTE es simplemente una red de estaciones base, *evolved NodeB* (eNB), con una arquitectura plana. No emplea un controlador inteligente centralizado, y los eNBs están normalmente interconectados mediante la interfaz X2 y mediante la interfaz S1 con el núcleo de la red (figura 4.3). La razón de dotar inteligencia a las estaciones base en LTE es para aumentar la velocidad de conexión y reducir el traspaso de llamadas entre células (*handover*). Para un usuario el tiempo de conexión en una sesión en tiempo real, por ejemplo en videojuegos, puede ser crucial. El tiempo de *handover* es crítico para los servicios en tiempo, como lo puede ser una llamada que el usuario colgará si el traspaso dura demasiado.

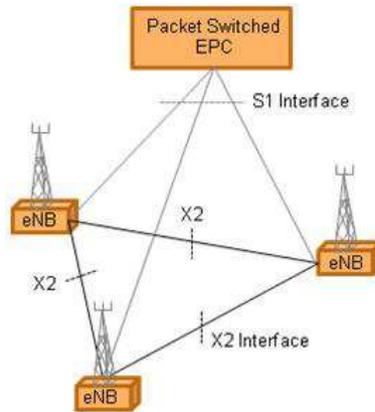


Figura 4.3. Interfaces S1 y X2 [13]

Otra ventaja de esta distribución de las estaciones base es que la capa de protocolo MAC, responsable de la planificación, se encuentra solo en el equipo de usuario (UE) y en la estación base, aumentando la velocidad de comunicación entre el eNB y el UE.

El planificador es un componente clave para lograr un uso eficiente del canal radio. El intervalo de tiempo de transmisión (TTI) está fijado en 1 ms. Durante este intervalo el planificador debe:

- Decidir que modulación y codificación va a emplear con cada UE, a partir de la información proporcionada sobre el enlace radio del UE.
- Priorizar los requerimientos de calidad del servicio entre los UEs. LTE soporta tanto servicios en tiempo real sensibles al retardo, como servicios de datos que requieren elevadas velocidades de pico.
- Informar a los UEs sobre la asignación de recursos radio. El eNB planifica a los UEs los enlaces de subida y de bajada. En LTE el número de canales es menor que en la tecnología predecesora UMTS (3G).

Con el objetivo de lograr una eficiencia espectral elevada así como una planificación eficiente en el dominio del tiempo y de la frecuencia, se eligió un enfoque de múltiples portadoras para el acceso múltiple por parte del 3GPP. Para el enlace descendiente se optó por el OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), y para el ascendente SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access) también conocido como DFT (Discrete Fourier Transform) spread OFDMA.

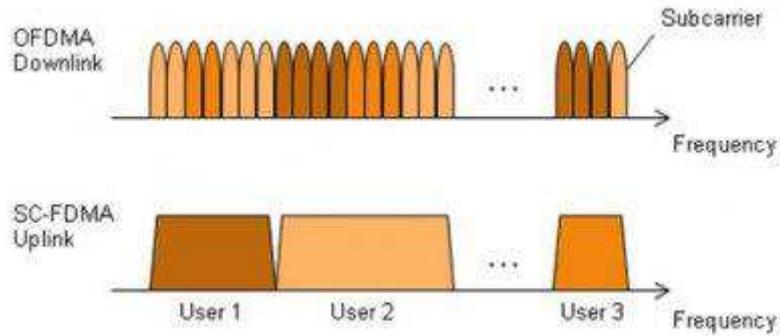


Figura 4.4. OFDMA y SC-FDMA [13]

Para posibilitar su utilización por todo el mundo LTE se ha desarrollado para un número de bandas de frecuencia (bandas de operación E-UTRA) que van desde los 700 MHz hasta los 2.7 GHz. Los anchos de banda disponibles pueden ir desde los 1.4 MHz hasta los 20 MHz. LTE soporta tanto TDD (Time Division Duplex) como FDD (Frequency Division Duplex).

En la release 9 del 3GPP se añadieron nuevos servicios como el Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS), que permite ver la televisión por streaming por ejemplo, y el home eNB (HeNB) para proporcionar o mejorar la cobertura en interiores de casas u oficinas.

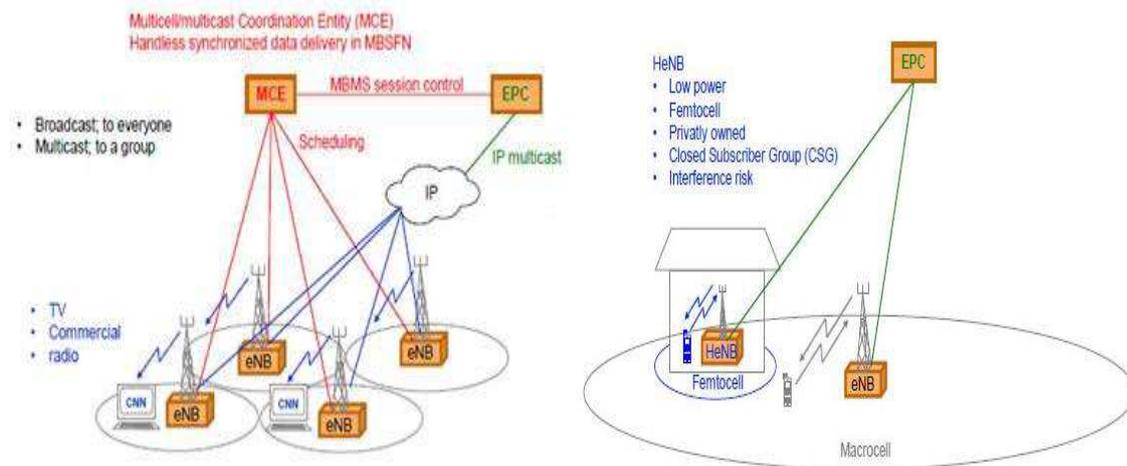


Figura 4.5. MBMS (izquierda) y HeNB (derecha) [13]

4.2.1. Parámetros radio de LTE

En la tabla 4.1 se muestran los distintos valores de algunos parámetros que se pueden adoptar en LTE en lo que al canal radio se refiere.

Parámetros		LTE (rel. 8)
Esquema de acceso	UL	SC-FDMA
	DL	OFDMA
Ancho de banda		1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz
TTI mínimo		1 ms
Espaciado de subportadoras		15 kHz
Modulación		QPSK, 16QAM, 64QAM
Bandas operativas		Bandas operativas LTE [14]
Potencia de transmisión del UE		23 dBm (max)

Tabla 4.1. Parámetros radio de LTE [15]

La figura 4.6 muestra la configuración del ancho de banda de transmisión en LTE por portadora de E-UTRA:

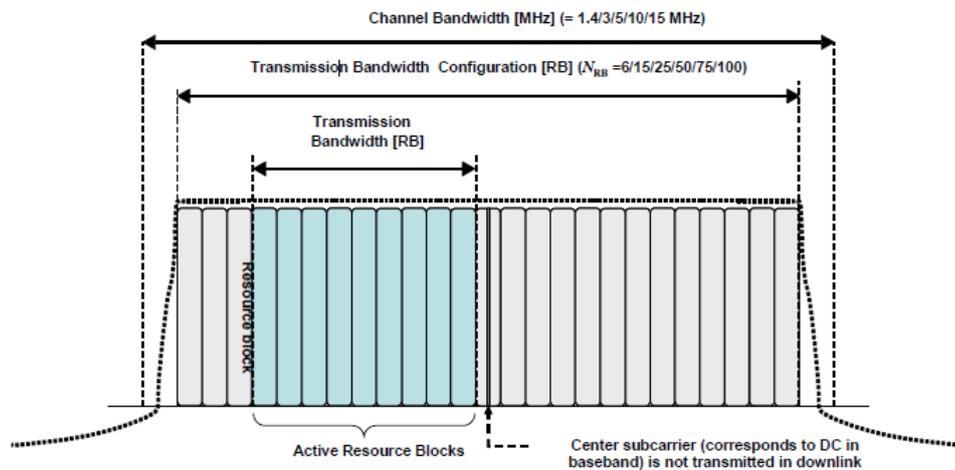


Figura 4.6. Configuración del ancho de banda de portadora E-UTRA [15]

4.2.2. Escenarios MIMO

LTE utiliza técnicas de multiantena o MIMO (Multiple Input Multiple Output) que consiste, de manera simplificada, en la transmisión y recepción de señal mediante el uso de múltiples antenas. Estas técnicas añaden una dimensión espacial adicional que permite la formación de canales estadísticamente independientes debido al multitrayecto y que a su vez mejoran el efecto del mismo, por lo que se mejoran las prestaciones del sistema y aumenta la velocidad del usuario final.

Dependiendo de la configuración escogida podemos tener distintas alternativas de técnicas multiantena:

- Antena única. Es la configuración más empleada en los enlaces inalámbricos más básicos. La información es transmitida desde una antena y recibida por una o más antenas. Suele dársele el nombre de SISO (Single Input Single Output) o SIMO (Single Input Multiple Output), también se la conoce como diversidad en recepción.
- Diversidad de transmisión. La información se transmite desde múltiples antenas (LTE soporta dos o cuatro). Esta técnica mejora la calidad de la señal recibida pero

no la velocidad de transmisión. Se emplea en los canales comunes así como en los de control y transmisión.

- Multiplexación espacial aprovechando el multitrayecto. De esta manera se establecen varios canales paralelos entre la estación base y el UE que permiten aumentar la tasa de datos sin que haya que aumentar también el ancho de banda del canal. Es necesario que los distintos caminos del multitrayecto lleguen al terminal con una relación a ruido alta.
- Diversidad espacial a partir del procesado de señal con el objetivo de contrarrestar los desvanecimientos (fading) del canal radio.
- Multi-User MIMO (MU-MIMO). Permite al sistema transmitir distintas tramas a distintos usuarios.
- Beam-forming. Es la más compleja de las técnicas MIMO y consiste en el empleo de arrays lineares que permiten a la antena centrarse en un determinado área. Esto reduce la interferencia y aumenta la capacidad.

En los entornos suburbano y rural la multiplexación espacial no es posible debido a la alta correlación entre señales, por lo que los beneficios vendrán por diversidad espacial. De esta forma para configuraciones de 2x2 se obtienen 3 dB de ganancia y para 4x4 se obtienen 6 dB.

4.3. Modelo de canal LTE

A continuación pasamos a caracterizar el canal radio de LTE. En primer lugar expondremos un modelo del canal constituido por etapas de retardo y después pasaremos a explicar el modelo de canal 3D del 3GPP.

4.3.1. Modelado mediante etapas de retardo

El modelo de canal propuesto se ha implementado siguiendo la norma [17]. Para simular las condiciones de propagación del desvanecimiento por multitrayecto se ha implementado un conjunto de tres modelos de canal:

- Extended Pedestrian A model (EPA)
- Extended Vehicular A model (EVA)
- Extended Typical Urban model (ETU)

El desvanecimiento por multitrayecto se ha modelado como una estructura mediante etapas de retardo (tapped-delay line), con el resultado mostrado en la tabla 4.2:

Modelo	Etapas	Retardo máximo (ns)	Potencia relativa (dB)
EPA	7	410	-20.8
EVA	9	2510	-16.9
ETU	9	5000	-7

Tabla 4.2. Modelo de canal mediante etapas de retardo

4.3.2. Modelo de canal 3D

Las técnicas multiantena vistas anteriormente son muy importantes a la hora de mejorar la eficiencia espectral y fiabilidad del enlace en un canal MIMO. Como resultado del interés mostrado en estas técnicas explotando las dimensiones de azimut y elevación de un canal inalámbrico, se inició un estudio en Enero de 2013 con el objetivo de incorporar un modelo de canal 3D dentro de la metodología de evaluación del 3GPP.

Los modelos de canal predecesores 2D de SCM (modelo de canal espacial para simulaciones MIMO) [40], la recomendación ITU M.2135-1 (directrices para la evaluación de las tecnologías de interfaz radio para IMT-Advanced) [41] y el modelo de canal 2D de WINNERII[42], situaban en un plano de dos dimensiones la localización de los dispersores, reflectores y antenas. Esto limitaba las técnicas de transmisión MIMO (formación del haz, precodificado, multiplexado espacial, multi-user MIMO...) a la dimensión azimut. Con el objetivo de incluir más técnicas como la formación del haz de elevación específica del UE y el FD-MIMO (full-dimension MIMO), dónde la transmisión está adaptada tanto en elevación como en el plano azimut, o la sectorización vertical se hizo necesaria la inclusión de un modelo de canal 3D.

Vamos a definir tres tipos de escenarios típicos de este estudio:

- 3D-UMi: Microcelda urbana con elevada densidad de UEs. La estación base se encuentra por debajo de los edificios que la rodean.
- 3D-UMa: Macrocelda urbana con elevada densidad de UEs. La estación base está por encima de los edificios que la rodean.
- 3D-UMa-H: Macrocelda urbana con un rascacielos por sector.

En modelo de canal 3D es aplicable a frecuencias de portadora entre los 2 y los 6 GHz con hasta 100 MHz de ancho de banda. Las frecuencias de portadora superiores (hasta los 300 GHz) son objeto del estudio que veremos más adelante sobre el 5G.

Para este tipo de modelo hay que tener en cuenta el estado LOS/NLOS y la determinación de las pérdidas del trayecto. En la release 12 del 3GPP [18] sobre el modelo del canal 3D, el modelo de probabilidad LOS considera principalmente los UEs al nivel de la calle. El impacto de la variación de la altura del UE en ambos modelos se tuvo en cuenta en los escenarios 3D-UMa y 3D-UMi.

Con el objeto de modelar la probabilidad LOS, las pérdidas del trayecto y el canal de desvanecimiento rápido se prefirió mantener la aproximación estocástica usada en los modelos SCM y del WINNERII que no dependían de las dimensiones del entorno. Esto permitió reusar parte de los parámetros 2D de los modelos no deterministas, incorporar resultados de medidas de múltiples fuentes y reducir el tiempo de procesado de las simulaciones.

Probabilidad LOS

La probabilidad LOS para el escenario 3D-UMa está modelada como la suma de dos probabilidades, las probabilidades LOS tipo 1 y tipo 2. Un UE está dentro del tipo 1 si un UE en la primera planta del mismo edificio está en estado LOS también (los UEs de las primeras plantas sólo pueden estar en el estado LOS tipo 1). La probabilidad LOS tipo 1 depende solo de la distancia horizontal entre el eNB y el UE y sigue la fórmula descrita en modelo ITU [19]. Un UE en

LOS en un piso elevado se considera en el estado tipo 2 LOS si un UE de la primera planta del mismo edificio nunca podrá tener estado LOS. A partir de los 12 m la probabilidad de estar en LOS tipo 2 aumenta.

En los escenarios 3d-UMi, donde la antena del eNB está por debajo de los edificios que la rodean, se comprobó mediante simulaciones de trazado de rayos que la altura del UE no afectaba a la probabilidad LOS. Por lo tanto es posible reutilizar el modelo 2D-UMi de la ITU [19].

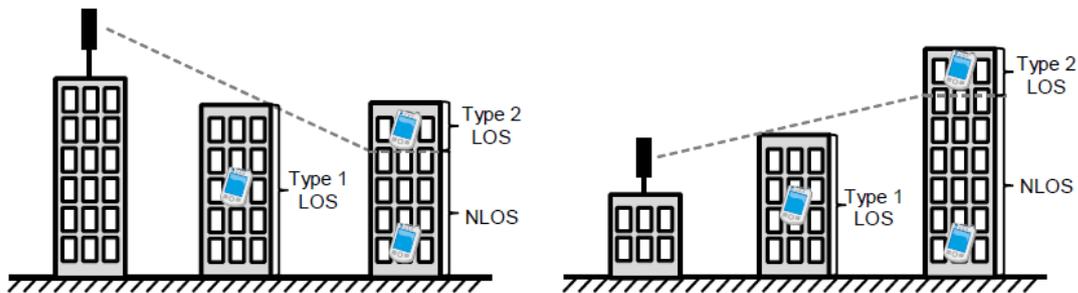


Figura 4.7. Probabilidades LOS tipo 1 y tipo 2 [39]

Modelado de pérdidas del camino

- Line Of Sight (LOS)

El 3GPP decidió modelar las pérdidas del trayecto LOS usando la distancia 3D entre el eNB y el UE junto con los coeficientes dados por la ITU para las ecuaciones de pérdidas del trayecto de los escenarios 3D-UMa y 3D-UMi. Esto proporcionó una aproximación razonable al modelo COST 231 y no precisa de las dimensiones de los edificios.

El modelo de pérdidas LOS de la ITU se trata de una ecuación con dos pendientes de pérdidas, la primera de 22 dB por década y la segunda más pronunciada. Al punto de transición entre ambas pendientes se le denomina punto de ruptura y depende de la reflexión dominante que puede añadirse (constructiva o destructivamente) al rayo directo recibido por el UE localizado en la calle.

- No Line Of Sight (NLOS)

Para el modelado de las pérdidas del camino en situación NLOS, en los escenarios 3D-UMa los trayectos de propagación dominantes viajan a través de múltiples difracciones por encima de las azoteas seguidas de la difracción en el borde del edificio. La atenuación aumenta con el ángulo de difracción al cambiar un UE de un piso más alto a uno más bajo, según la ecuación $-\alpha(h - 1.5)$, donde $\alpha(\text{dB/m})$ es la ganancia.

En los escenarios 3D-UMi los trayectos de propagación dominantes viajan a través y alrededor de los edificios, el UE incluso puede recibir señal de la propagada por encima de las azoteas.

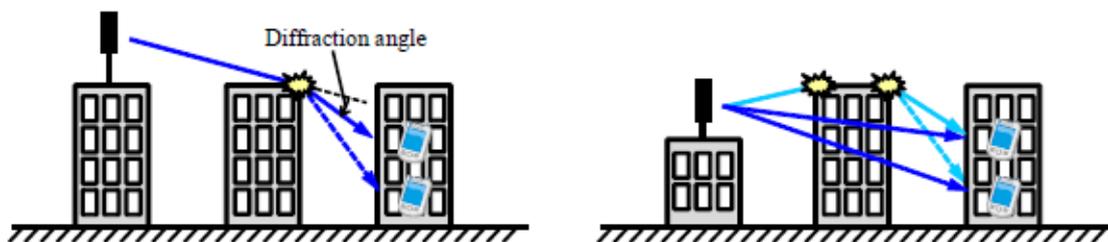


Figura 4.8. Escenario 3D-UMa (izquierda) y 3D-UMi (derecha) [39]

A continuación vamos a ver algunos ejemplos de modelos de pérdidas del camino recogidos en [18], para lo cual en primer lugar necesitamos definir las distancias como lo están en la figura 4.9, para después poder utilizarlas en los modelos de la tabla 4.3.

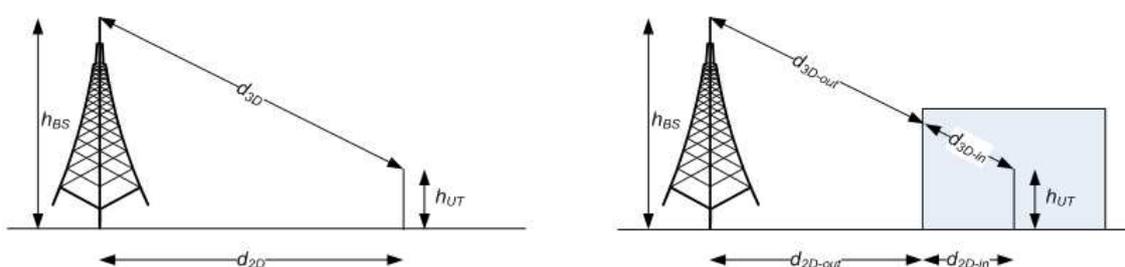


Figura 4.9. Definiciones de distancias para exteriores e interiores [18]

Escenario	Pérdidas del camino [dB], f_c [GHz], d [m]	Rango de aplicación [m]
3D-UMi LOS	$PL = 22.0 \log_{10}(d_{3D}) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c)$	$10\text{m} < d_{2D} < d'_{BP}$
	$PL = 40 \log_{10}(d_{3D}) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$d'_{BP} < d_{2D} < 5000\text{m}$ $h_{BS} = 10\text{m}$, $1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$
3D-UMi NLOS	$PL = \max(PL_{3D-UMi-NLOS}, PL_{3D-UMi-LOS})$	$10\text{m} < d_{2D} < 2000\text{m}$
	$PL_{3D-UMi-NLOS} = 36.7 \log_{10}(d_{3D}) + 22.7 + 26 \log_{10}(f_c) - 0.3(h_{UT} - 1.5)$	$h_{BS} = 10\text{m}$ $1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$
3D-UMa LOS	$PL = 22.0 \log_{10}(d_{3D}) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c)$	$10\text{m} < d_{2D} < d'_{BP}$
	$PL = 40 \log_{10}(d_{3D}) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$d'_{BP} < d_{2D} < 5000\text{m}$ $h_{BS} = 25\text{m}$, $1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$
3D-UMa NLOS	$PL = \max(PL_{3D-UMa-NLOS}, PL_{3D-UMa-LOS})$	$10\text{m} < d_{2D} < 5\,000\text{m}$
	$PL_{3D-UMa-NLOS} = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2) \log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS})) (\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2 (\log_{10}(17.625))^2 - 4.97) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$	$h = \text{altura media edificios}$, $W = \text{ancho de la calle}$, $5\text{m} < h < 50\text{m}$ $5\text{m} < W < 50\text{m}$ $10\text{m} < h_{BS} < 150\text{m}$ $1.5\text{m} \leq h_{UT} \leq 22.5\text{m}$

Tabla 4.3. Modelos de pérdidas del camino [18]

Modelo de desvanecimiento rápido

Una vez hemos tratado los temas de la probabilidad LOS y las pérdidas del trayecto, vamos a pasar a estudiar el modelo de desvanecimiento rápido. Tomaremos como referencia el enlace descendente, por lo que los ángulos de salida serán los del eNB y los de llegada los del UE. Los coeficientes de desvanecimiento rápido del canal modelan las fluctuaciones que tienen lugar a lo largo del tiempo en los canales inalámbricos y que son causadas por una combinación del multitrayecto y del movimiento del UE. Estos coeficientes vendrán determinados por la combinación de las respuestas al impulso del canal de las componentes del multitrayecto (MPCs). Cada MPC está caracterizada por un retardo y fases aleatorias introducidas por el trayecto, así como ángulos azimut de salida y llegada (AOD y AOA) y ángulos de elevación de salida y llegada (ZOD y ZOA).

En la figura 4.10 se muestran los pasos a seguir para la generación de los coeficientes de canal de desvanecimiento rápido en el modelo de canal 3D del 3GPP. El procedimiento es parecido al del modelo de canal 2D pero algunos pasos han sido modificados para tener en cuenta las características de elevación expuestas en la introducción de este punto.

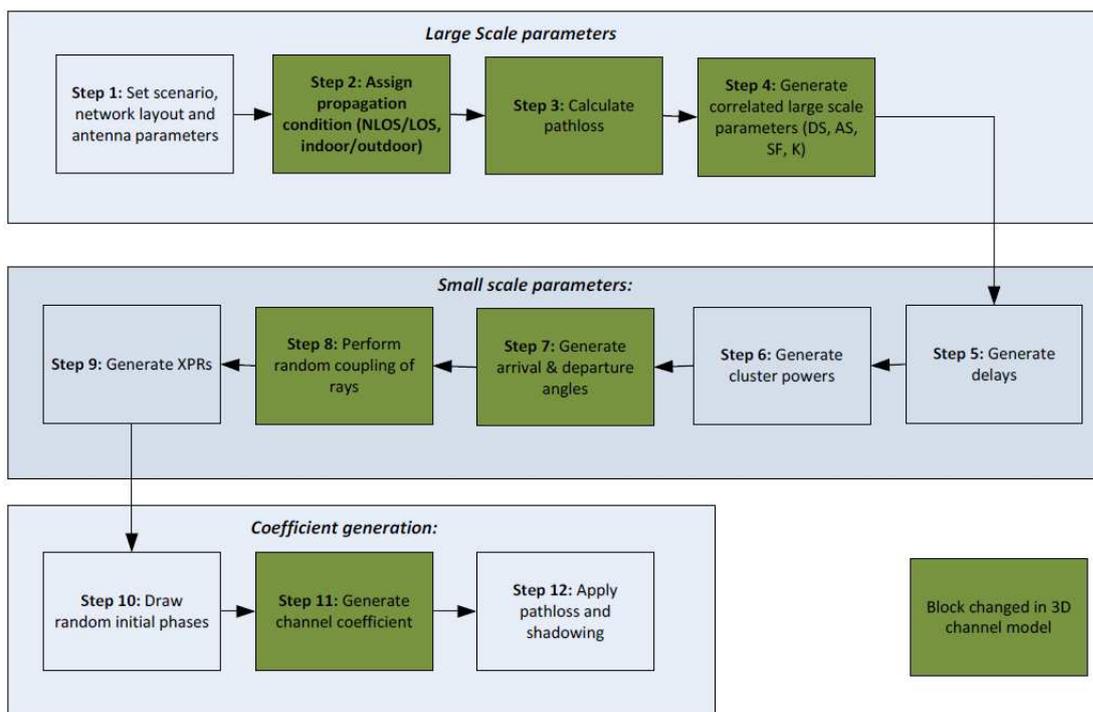


Figura 4.10. Pasos para la generación del canal en el modelo de canal 3D del 3GPP [18]

4.4. Modelos utilizados en LTE

Llegados a este punto en el que ya hemos visto los conceptos básicos de LTE así como el modelo de canal, vamos a explicar los modelos de predicción de pérdidas de uso más común en este tipo de tecnología. En primer lugar señalaremos cada uno de ellos para, a continuación, realizar una comparativa de los mismos [20] y sacar conclusiones del comportamiento de cada uno dependiendo del entorno.

En España, a día de hoy, el estándar LTE dispone de 3 bandas de frecuencia (20, 3, 7). En la tabla 4.4 podemos observar las frecuencias de cada una de ellas:

Frecuencia [MHz]	Banda	Frecuencia subida [MHz]	Frecuencia bajada [MHz]
800	20	832-862	791-821
1800	3	1710-1785	1805-1880
2600	7	2500-2570	2620-2690

Tabla 4.4. Bandas de frecuencia LTE en España

Según un estudio realizado sobre los requisitos técnicos que se precisan para garantizar la cobertura LTE en nuestro país [16], los modelos recomendados para cada una de estas bandas son:

- Banda 800 MHz – Modelo de Okumura-Hata
- Bandas 1800 MHz y 2600 MHz – Modelo COST 231 Hata

Algunos de los modelos que expondremos a continuación ya han sido comentados anteriormente, sin embargo, es interesante volver a repasarlos con el objetivo de establecer posteriormente una comparación clara entre ellos.

Los modelos de propagación que van a ser objeto del estudio comparativo son:

- Modelo SUI (punto 3.3.2)
- Modelo Okumura (punto 3.2.2)
- Modelo Okumura-Hata (punto 3.2.2)
- Modelo COST 231 Hata (punto 3.4.1)
- Modelo COST 231 Walfisch Ikegami (punto 3.3.4)
- Modelo Ericsson 9999 (punto 3.3.2)

4.4.1. Comparación de modelos

Una vez que hemos visto los modelos más empleados en LTE, vamos a realizar una comparación de ellos basándonos en un estudio realizado en 2011 [20]. A la hora de analizar estos modelos el primer problema que nos encontramos es que el estándar LTE no dispone de una única banda en todo el mundo, sino que cuenta con un conjunto de bandas de frecuencia denominadas bandas operativas de LTE [14]. En el estudio citado previamente la simulación se lleva a cabo en las bandas de 1900 MHz y 2100 MHz y para dos alturas de la antena transmisora (30 y 80 m), aunque en este trabajo sólo lo veremos para 1900 MHz y 30 m de altura de la antena de la EB, que es el caso que más se aproxima a la banda de 1800 MHz utilizada en España.

La tabla 4.5 muestra los parámetros que se emplearon en la simulación:

Parámetros	Valores
Potencia de transmisión de la EB	43 dBm
Potencia de transmisión del móvil	30 dBm
Altura de la antena de transmisión	30 m
Altura de la antena de recepción	3 m
Frecuencia operativa	1900 MHz
Distancia entre transmisor y receptor	5 km
Distancia entre edificios	50 m
Altura media de los edificios	15 m
Anchura de la calle	25 m
Ángulo de orientación a la calle	30° (urbano) 40° (suburbano)
Corrección por ensombrecimiento	8.2 dB (suburbano y rural) 10.6 dB (urbano)

Tabla 4.5. Parámetros de simulación de estudio comparativo LTE

En la simulación llevada a cabo, con el objetivo de que fuera lo más realista posible, se consideró una situación NLOS para todos los escenarios (urbano, suburbano y rural) excepto para el modelo COST 231 W-I que se consideró LOS ya que no aportaba nada en el caso rural.

El resultado de las simulaciones puede observarse en las figuras 4.11 a 4.15 que representan las pérdidas del trayecto en función de la distancia y del escenario.

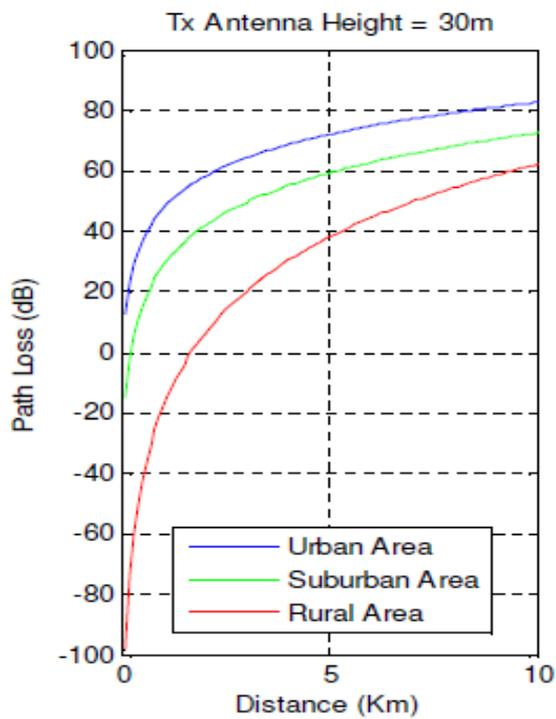


Figura 4.11. Resultado del modelo SUI

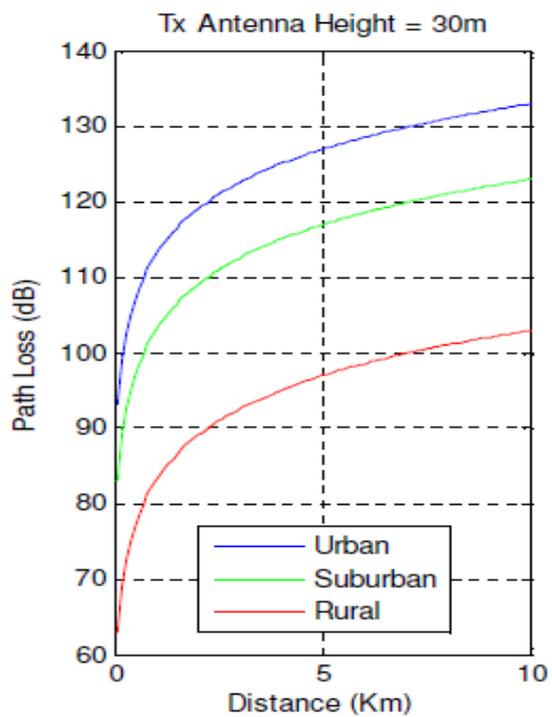


Figura 4.12. Resultado del modelo Okumura

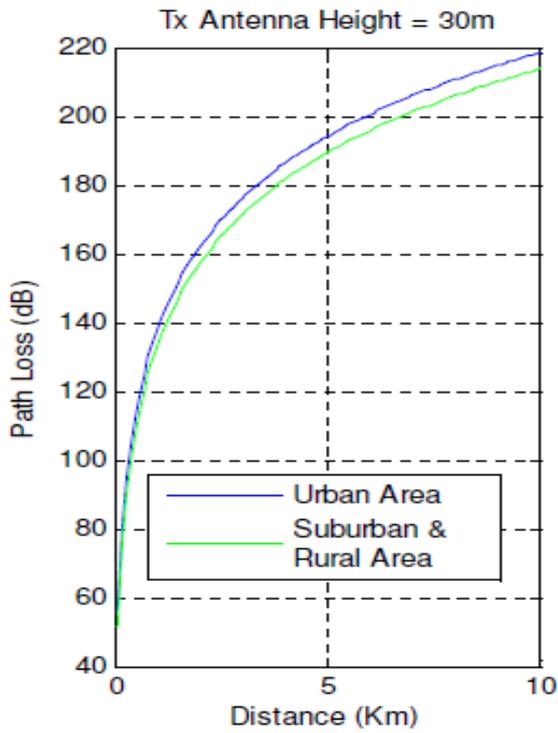


Figura 4.13. Resultado del modelo COST 231 Hata

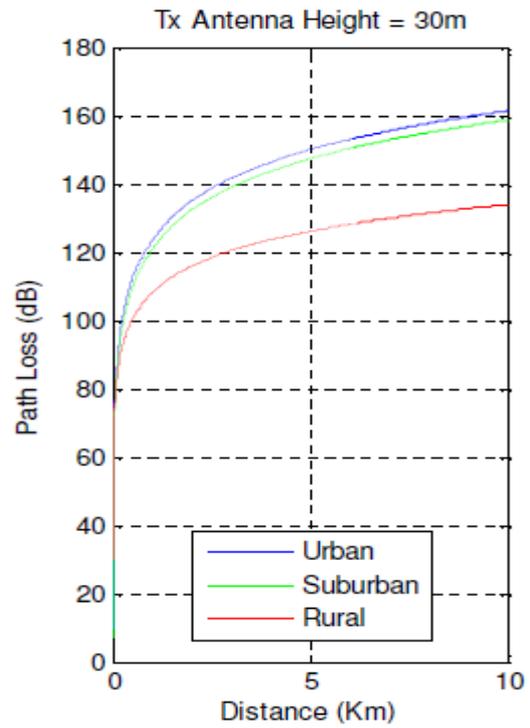


Figura 4.14. Resultado del modelo COST 231 W-I

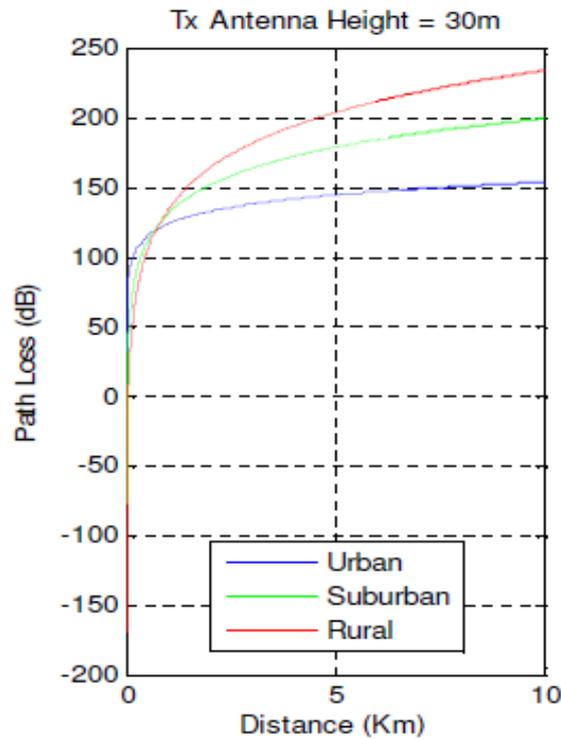


Figura 4.15. Resultado del modelo Ericsson 9999

Con el objetivo de simplificar la comparación de los resultados obtenidos, la tabla 4.6 recoge la acumulación de las pérdidas del trayecto por entornos y modelos, y para una distancia entre la estación base y el móvil de 5 km.

Modelo	PL urbano [dB]	PL suburbano [dB]	PL rural [dB]
SUI	72.17	59.83	38.20
Okumura	126.99	116.99	96.99
COST 231 Hata	194.03	189.32	189.32
COST 231 W-I	150.20	147.51	126.35
Ericsson 9999	144.31	178.38	203.26

Tabla 4.6. Comparativa de resultados de todos los modelos [20]

4.4.2. Conclusiones

A partir de la tabla 4.6 vamos a sacar conclusiones sobre el empleo de cada modelo en un determinado terreno.

En cuanto al entorno urbano, vemos que el modelo SUI es el que estima las pérdidas más bajas, mientras que las más altas resultan del modelo COST 231 Hata. Lo mismo pasa en el caso del área suburbana. En los resultados del entorno rural ocurre que las pérdidas más altas resultan del modelo Ericsson 9999, sin embargo esto no es realista ya que este modelo no fue diseñado para entornos rurales, y si lo comparamos con el resto de modelos es el único que obtiene mayor pérdidas en el entorno rural que en el suburbano y urbano. Por lo tanto para medios rurales las pérdidas más bajas vuelven a ser las del modelo SUI y las más altas las del modelo COST 231 Hata.

En el estudio al que nos hemos referido desde el comienzo de este punto [20], se realizan simulaciones también para la banda de 2100 MHz y aumentando la altura de la antena de la EB a 80 m. El impacto que tiene el aumentar la frecuencia es el de aumentar ligeramente también las pérdidas, ya que en las ecuaciones de los modelos ambas son directamente proporcionales, excepto en el caso del modelo COST 231 Hata ya que se hizo el cálculo para una única frecuencia. Por el contrario, el efecto de aumentar la altura de la antena transmisora es la disminución de las pérdidas.

4.5. Conceptos básicos sobre LTE-Advanced

A continuación vamos a presentar algunos aspectos importantes de la evolución de LTE conocida como LTE Advanced (LTE-A). Esta tecnología fue desarrollada por el 3GPP en la *release* 10 y surgió de la necesidad de aumentar la tasa de datos de una manera eficiente para que se cumpliesen los requisitos establecidos por la ITU para el IMT Advanced (4G). Las mejoras que se implementaron con respecto a LTE son:

- Aumento de la tasa de pico, en el enlace descendente a 3 Gbps y en el ascendente a 1.5 Gbps
- Incremento de la eficiencia espectral (de 16 bps/Hz a 30 bps/Hz)
- Aumento del número de suscriptores simultáneos
- Mejora de velocidad en los límites de las celdas

Las nuevas funcionalidades introducidas en LTE-A fueron la agregación de portadoras o *Carrier Aggregation* (CA), la mejora de las técnicas multiantena y el uso de nodos de repetición regenerativa o *Relay Nodes* (RN). A continuación veremos cada una de estas mejoras.

4.5.1. Agregación de portadoras (Carrier aggregation)

La forma más sencilla de incrementar la capacidad del sistema es aumentando el ancho de banda. Como también es importante mantener la compatibilidad con los UEs de las versiones anteriores (8 y 9) se implementó mediante la agregación de portadoras de estas versiones tanto en FDD como en TDD.

Cada portadora agregada puede tener un ancho de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15 ó 20 MHz de forma independiente y puede agregarse un máximo de 5 de ellas, resultando el ancho de banda máximo de 100 MHz. El número de portadoras en cada enlace puede ser distinto siempre y cuando el ascendente no tenga más que el descendente, por ejemplo, en la release 10 se contaba con 2 portadoras para el enlace descendente y otra para el ascendente.

Hay distintas maneras de configurar la agregación de portadoras. La más sencilla de ellas es situarlas dentro de la misma banda de forma consecutiva (como en LTE) y se la denomina *Intra-band contiguous*. Otra manera de posicionarlas dentro de la misma banda de frecuencia es con espacios entre las distintas componentes, y recibe el nombre de *Intra-band non-contiguous*. La tercera manera es colocar las componentes en distintas bandas de frecuencia, *Inter-band non-contiguous*.

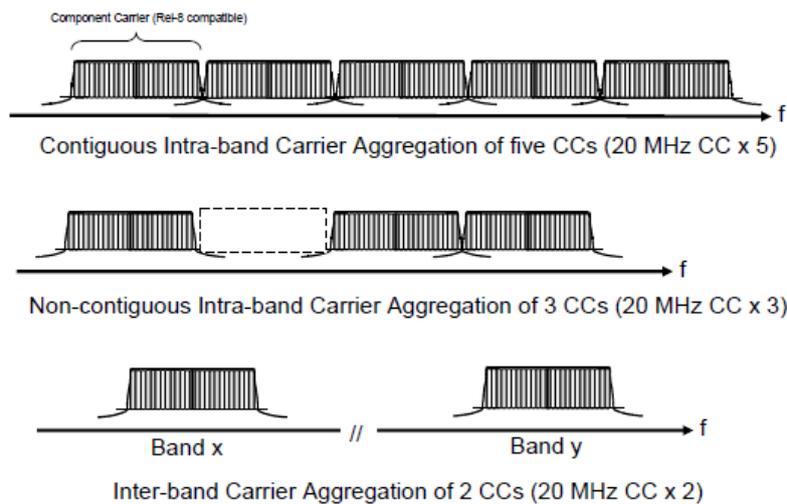


Figura 4.16. Tipos de configuraciones en agregación de portadoras [15]

Cuando se emplea la agregación de portadoras se establece un número de células de servicio, una por cada una de ellas, y no todas tienen la misma cobertura. En la figura 4.17 vemos un ejemplo de Inter-band non-contiguous donde el UE negro tiene cobertura para las 3 portadoras agregadas mientras que el UE blanco no está dentro del área de cobertura de la componente roja.

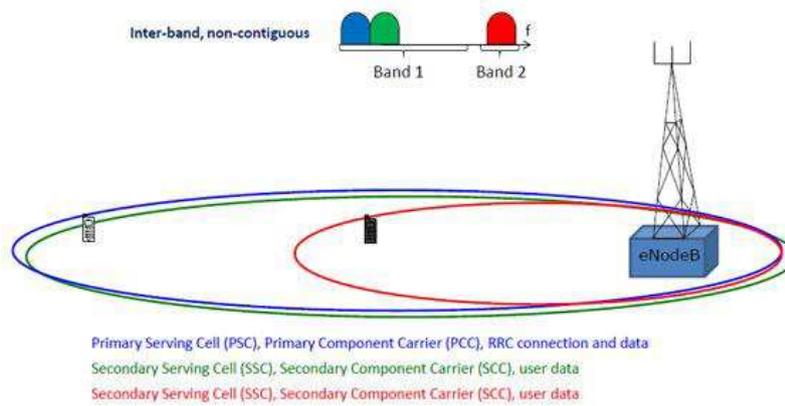


Figura 4.17. Ejemplo de CA del tipo Inter-band non-contiguous [21]

4.5.2. Multiplexado espacial (MIMO)

Las técnicas MIMO ya han sido introducidas en el apartado sobre conceptos básicos de LTE, por lo que únicamente vamos a centrarnos en las mejoras incorporadas en LTE-A. La más importante de todas ellas fue la introducción del 8x8 en el enlace descendente y el 4x4 en el ascendente.

Para poder utilizar la técnica de multiplexado espacial se precisa de una buena relación señal a ruido en recepción, por lo que no siempre va a ser posible utilizarla y en algunos casos será recomendable el uso de otro tipo de técnicas MIMO. En LTE-A hay definidos 9 modos de transmisión para el enlace descendente y dos para el ascendente. Entre ellos se diferencian por el número de capas que tienen, los puertos de las antenas que usan, el tipo de señal de referencia o el precodificado empleado.

El modo de transmisión 9 (TM 9) es el que utiliza la técnica 8x8 en el enlace descendente, mientras que el TM 2 emplea el 4x4 en el ascendente. Consecuentemente también fue necesario que los UEs soportasen estas mejoras, por lo que se introdujeron 3 nuevas categorías de móviles (6, 7 y 8).

4.5.3. Nodos de repetición regenerativa (Relay Nodes)

Los RNs (Relay Nodes) permiten la planificación eficiente de redes con distintos tamaños de células en LTE-A. Se tratan de estaciones base de baja potencia que proveen cobertura en los límites de las celdas o zonas de alta densidad de usuarios. Cada RN está conectado a un DeNB (Donor eNB) mediante la interfaz radio Un, que se trata de una modificación de la interfaz radio Uu de la E-UTRAN.

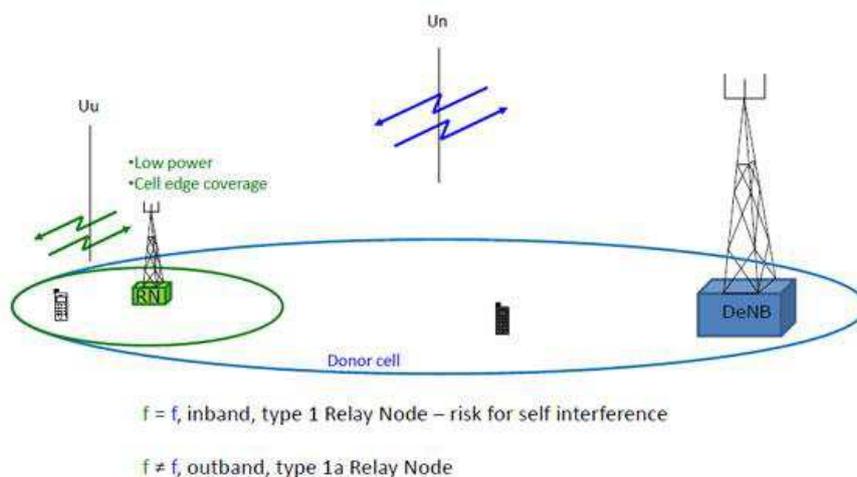


Figura 4.18. Relay Nodes [21]

Es importante señalar el hecho de que esta tecnología se encuentra actualmente en desarrollo. Desde su aparición en la *release* 10 hasta la 14 (abierta a día de hoy) se han ido implementando nuevas mejoras y técnicas en LTE-Advanced, como por ejemplo la introducción de estrategias coordinadas de transmisión/recepción multipunto entre nodos de la red (CoMP, Coordinated Multi Point operation) perteneciente a la *release* 11 [21].

4.5.4. Parámetros radio de LTE-A

Otro de los aspectos importantes en el estudio del estándar LTE-Advanced son los parámetros radio. Como ya hemos explicado en el apartado anterior, el hecho de usar la técnica de agregación de portadoras condiciona los aspectos de radiofrecuencia.

En los casos del esquema de acceso y ancho de banda se emplean los mismos que en LTE para ambos enlaces (DFTS-OFDM y OFDMA), pero teniendo en cuenta ahora la estructura basada en agregación de portadoras.

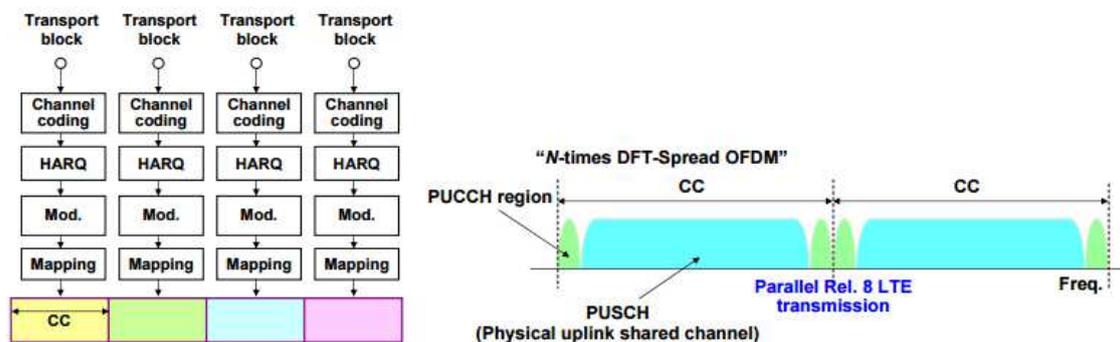


Figura 4.19. Esquemas de acceso: enlace descendente (izquierda) y enlace ascendente (derecha) [22]

En cuanto a las bandas operativas de LTE-A, éstas son las mismas que las utilizadas en LTE [14] junto con nuevas bandas de frecuencia incorporadas por la ITU en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones que tuvo lugar en Ginebra en el 2007 [23].

4.6. Estudio comparativo de modelos de propagación para LTE-A

Una vez que hemos conocido las características del estándar LTE-Advanced y sus parámetros radio, nos encontramos en disposición de estudiar la precisión de distintos modelos de propagación empíricos para posteriormente compararlos entre ellos y ver cuál se ajusta más a cada tipo de entorno. Para este cometido vamos a basarnos en un estudio realizado en el 2012 y que comparaba 4 modelos de predicción distintos en tres tipos de terreno diferentes [24].

El estudio de cada modelo está centrado en la banda de 2 GHz y se evalúa en tres entornos, urbano, suburbano y rural. El análisis de los efectos de la propagación se ha realizado mediante el método estadístico de Monte-Carlo, teniendo en cuenta que un sistema de comunicaciones móviles puede ser considerado como una serie de variables aleatorias. De esta forma, si los parámetros de entrada (parámetros del sistema, modelo de propagación...) están definidos correctamente, puede simularse un sistema en tiempo real cuando hay suficientes muestras disponibles.

4.6.1. Modelos utilizados en LTE-Advanced

Modelo de espacio libre

El modelo de espacio libre asume la condición de la propagación ideal donde solo hay un trayecto despejado en situación LOS entre el transmisor y el receptor. Este modelo no se utiliza como modelo de predicción sino como modelo de comparación. H.T. Friis presentó la ecuación 4.1 para calcular la potencia de la señal recibida en función de la distancia al transmisor:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (4.1)$$

Donde:

P_t : potencia de la señal transmitida

G_t : ganancia de la antena transmisora

G_r : ganancia de la antena receptora

d : distancia entre el transmisor y el receptor

La misma ecuación puesta en decibelios resulta:

$$P_r(d) = P_t + G_t + G_r + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (4.2)$$

El modelo de propagación en espacio libre representa un círculo alrededor del transmisor dentro del cual el receptor tendrá cobertura.

Modelo Hata extendido (COST 231 Hata)

Los detalles de este modelo ya han sido expuestos en el punto 3.4.1.

Modelo de la ITU-R P.1546-4

Los detalles de este modelo ya han sido expuestos en el punto 3.2.2.

Modelo JTG5-6

El modelo de propagación JTG 5-6 perteneciente a la misma recomendación de la ITU es una combinación del modelo de Hata extendido y el de la recomendación P.1546-4 de la ITU, ambos vistos en los apartados anteriores.

El modelo tiene un comportamiento que depende de la distancia entre el transmisor y el receptor de la siguiente manera:

- Hasta los 40 m la pérdida básica es idéntica a la del espacio libre, pero teniendo en cuenta la distancia real (combinación de la altura y de la horizontal) entre el transmisor y el receptor.
- Entre los 40 y los 100 m, la pérdida básica se calcula mediante una interpolación lineal entre el modelo de espacio libre y el de Hata extendido.
- Entre 100 m y 1000 m, la interpolación lineal se realiza entre el modelo de Hata y el P.1546-4.

$$L(d) = L(0.1) + \frac{[\log(d) - \log(0.1)]}{[\log(1) - \log(0.1)]} [L(1) - L(0.1)] \quad (4.3)$$

$L(1)$: pérdida básica calculada mediante P.1546-4 en el km 1

$L(0.1)$: pérdida básica mediante Hata extendido en el km 0.1

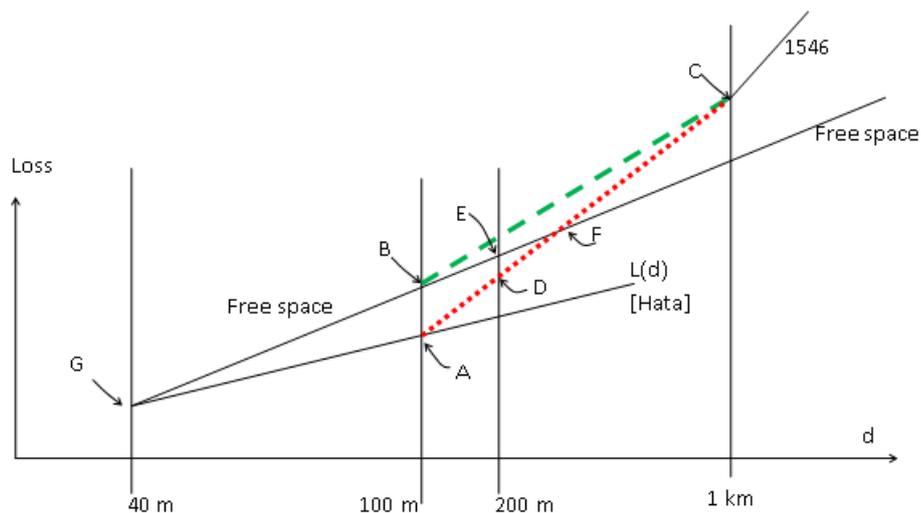


Figura 4.20. Modelo JTG5-6 entre 100 y 1000 m [26]

- A partir del km la representación de la pérdida básica decrece entre 30 y 40 dBs por década dependiendo de la altura de las antenas.

- A partir de los 20 km entra en juego la curvatura de la Tierra y las pérdidas aumentan a 60 dBs por década.

Para el posterior estudio comparativo, nos centraremos en la región comprendida entre 1 y 10 km de este modelo, por lo que nos hallaremos en el caso dependiente de las alturas de ambas antenas.

4.6.2. Comparación de modelos

A continuación vamos a pasar a la comparación de los modelos expuestos. Para lograr este objetivo vamos a analizar los resultados de cada uno de ellos, desprendidos de un estudio llevado a cabo en 2012 [24], en tres escenarios distintos (rural, urbano y suburbano), y posteriormente extraeremos conclusiones de las soluciones obtenidas.

Los parámetros empleados para los cálculos son:

Parámetro	Valor
Frecuencia	2000 MHz
Altura de la antena transmisora	30 m
Altura de la antena receptora	1.5 m
Polarización de la antena	Horizontal
Porcentaje de tiempo	50%
Porcentaje de localización	50%
Suelo de ruido	-95 dBm
Ganancia de la antena transmisora	15 dB
Ganancia de la antena receptora	0 dB
Relación portadora-interferencia	11 dBm
Distancia entre el transmisor y el receptor	1-10 km

Tabla 4.7. Parámetros del estudio comparativo [24]

El primer caso que vamos a estudiar es la propagación en el medio rural de los cuatro modelos de predicción de pérdidas. En la gráfica de la figura 4.21 están representados los resultados de la simulación de cada modelo en este tipo de entorno:

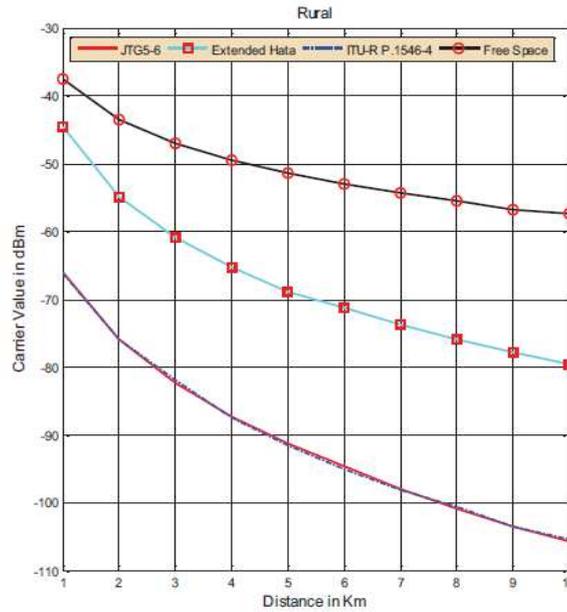


Figura 4.21. Comparación de los modelos en el medio rural [24]

En la figura 4.21 podemos comprobar que, en el área rural, el modelo que más se ajusta a la realidad de los cuatro es el del espacio libre, porque no considera posibles obstáculos en el camino (situación LOS). Por el contrario, el modelo de Hata extendido utiliza una cantidad pequeña de datos del terreno, y los modelos ITU-R P.1546 y JTG 5-6 una mayor cantidad.

El segundo escenario donde vamos a estudiar estos modelos es el urbano. La figura 4.22 muestra una gráfica comparativa de los modelos en este tipo de entornos:

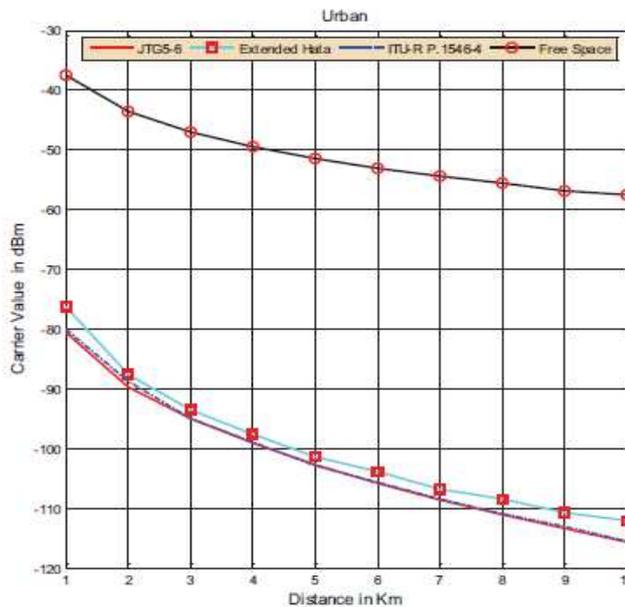


Figura 4.22. Comparación de los modelos en el medio urbano [24]

Los resultados obtenidos para el área urbana revelan que la atenuación de la señal obtenida con el modelo de Hata extendido es menor que la obtenida con los modelos ITU-R P.1546 y JTG 5-6.

El último de los escenarios contemplados en este estudio es el suburbano. La representación de la pérdida básica obtenida con cada modelo en este entorno viene representada en la figura 4.23 a continuación:

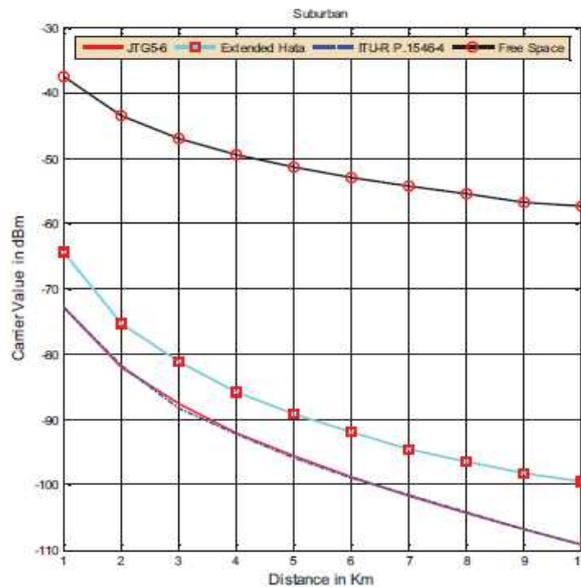


Figura 4.23. Comparación de los modelos en el medio suburbano [24]

De la gráfica anterior se desprende que los resultados de las simulaciones de este caso se encuentran entre los obtenidos en los dos anteriores. El modelo de Hata extendido logra mejores resultados que en el caso del escenario urbano.

Como conclusión final hay que destacar que las simulaciones obtenidas en todos los escenarios muestran que los modelos JTG 5-6 e ITU-R P.1546 arrojan resultados muy similares, esto es debido a que el modelo JTG 5-6 tiende al P.1546 para las distancias calculadas. También cabe señalar que estos dos modelos dan una pérdida básica superior al resto en todos los escenarios porque tienen en cuenta más factores. Sin embargo, el modelo que proporcionó los resultados que más se ajustaban a la realidad fue el de Hata extendido.

4.6.3. Ejemplo de simulación de red LTE-A

Para finalizar con la parte de los modelos de propagación para comunicaciones móviles 4G, vamos a mostrar los resultados de un estudio real de una red LTE-Advanced mediante cuatro modelos de propagación (dos empíricos y dos deterministas) distintos realizada en la ciudad de Bogotá [27]. Los modelos de propagación empíricos utilizados son el Hata Cost 231 y el Urban 3GPP LTE, mientras que los deterministas son dos modelos basados en el estándar ITU-R 525, el correspondiente a ITU-R 525 + Deygout 94 + Fine Integration y a ITU-R 525 + Deygout 66 + Deygout 66.

Los parámetros utilizados para la simulación se recogen en la tabla 4.8:

Parámetro	Valor
Potencia del eNodeB	10 W
Ganancia de las antenas	15 dBi
Pérdidas de cables en eNodeB	0.5 dB
Frecuencia de portadora	2 GHz
Ancho de banda del canal	10 MHz
Modulación	64QAM
Ruido	-98 dBm
Relación Portadora-Interferencia	1 dB
Porcentaje de la señal de referencia	10%
Porcentaje PDSCH	70%
Porcentaje de canales de control	20%

Tabla 4.8. Parámetros de simulación de la red LTE-A [27]

➤ Modelos empíricos

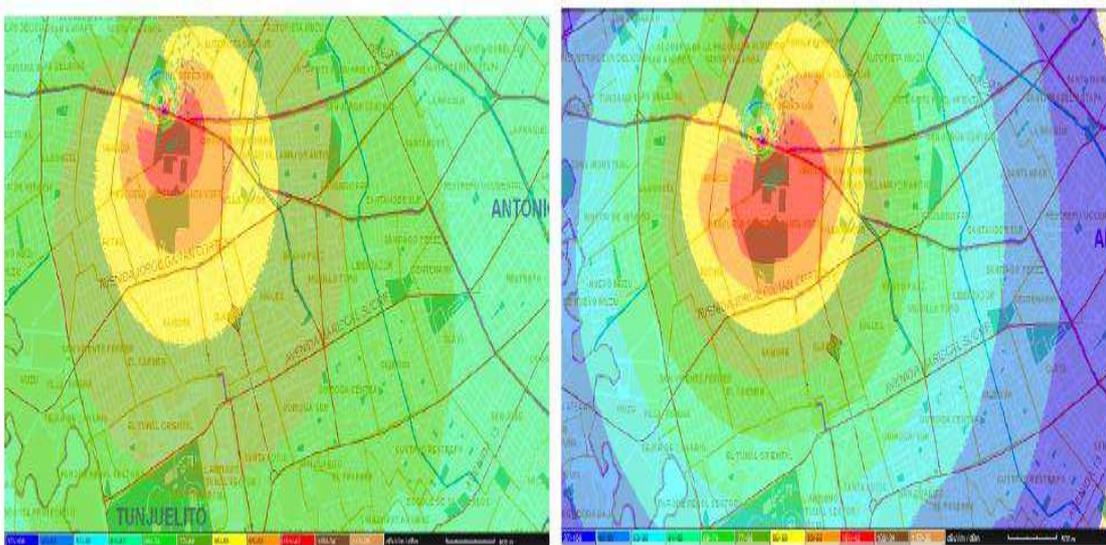


Figura 4.24. Cobertura del modelo Hata COST 231 (izquierda) y del modelo Urban 3GPP LTE (derecha) [27]

➤ Modelos deterministas

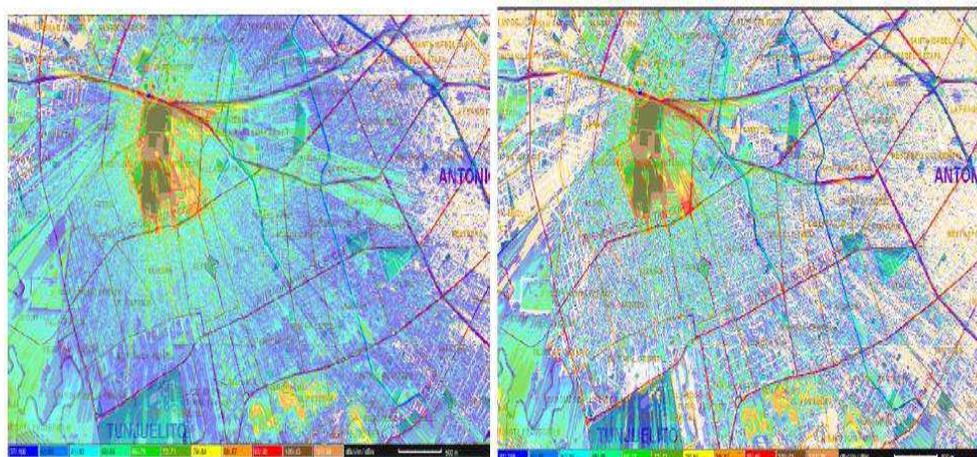


Figura 4.25. Cobertura del modelo ITU-R 525 + Deygout 94 + Fine Integration (izquierda) y del ITU-R 525 + Deygout 66 + Deygout 66 (derecha) [27]

Los resultados del estudio [27] que analiza la correlación de los modelos propuestos se muestran en la tabla 4.9:

Modelo	Desviación estándar [dB]	Media de error [dB]	Factor de correlación
Hata Cost 231	11.20	22.58	0.77
3GPP LTE Urban	20.76	-6.01	0.78
ITU525 + Deygout 94 + Fine Integration	7.29	0.67	0.91
ITU525 + Deygout66 + Deygout66	8.24	-2.36	0.89

Tabla 4.9. Resultados del análisis de correlación [27]

Basándonos en los resultados obtenidos del análisis de correlación de los modelos, comprobamos que los modelos deterministas poseen un mejor factor de correlación, siendo el del modelo ITU525 + Deygout 94 + Fine Integration el mejor de todos. Si quisiéramos mejorar la precisión de los modelos empíricos podríamos añadirles algunas características geométricas (modelos semi-empíricos).

El siguiente paso en el estudio de los modelos de propagación será su acondicionamiento a la nueva generación de móviles 5G que veremos en el apartado 5.

5. Propuestas de modelos de propagación para comunicaciones móviles 5G

En este apartado vamos a centrarnos en las redes de nueva generación o 5G, con el objetivo de vislumbrar, a partir de recomendaciones y estudios ya realizados, como será el nuevo canal y modelos de propagación para esta tecnología.

5.1. Introducción al 5G

En primer lugar vamos a realizar una breve exposición de los requisitos definidos por la NGMN (Next Generation Mobile Networks Alliance) para la quinta generación de móviles. La NGMN es una asociación de operadores móviles, fabricantes e institutos de investigación que evalúan las tecnologías candidatas a convertirse en la nueva evolución de las redes inalámbricas. Esta asociación publicó en Marzo de 2015 un documento [28] con los requerimientos que debían satisfacerse en la nueva generación de móviles.

Para la nueva generación 5G existen una serie de necesidades como lo son mejorar el rendimiento del sistema, disminuir la latencia, aumentar la seguridad y la conectividad así como la cobertura. La arquitectura de 5G deberá incluir funciones de red modulares que puedan ser escaladas por demanda, para adaptar varios casos de uso de manera ágil y eficiente. También se espera que en 5G se opere en un entorno heterogéneo caracterizado por la existencia de múltiples tecnologías de acceso, redes multicapa, diferentes tipos de dispositivos, etc.

5.1.1. Casos de uso de la visión del 5G

La NGMN ha desarrollado 25 casos de uso y los ha agrupado en 8 familias. Estos casos de uso sirven como punto de partida a la hora de definir los requisitos y la arquitectura de la nueva generación. A continuación vamos a presentar estas familias con un ejemplo de uso en cada una de ellas:

- 1) Acceso de banda ancha en áreas densas: vídeo penetrante
- 2) Acceso de banda ancha en cualquier lugar: superar 50 Mbps en cualquier parte
- 3) Movilidad de usuario más alta: en trenes de alta velocidad
- 4) IoT (Internet of Things) a gran escala: redes de sensores
- 5) Comunicaciones en tiempo real extremas: internet táctil
- 6) Comunicaciones de emergencia: en desastres naturales
- 7) Comunicaciones de máxima confianza: servicios e-salud
- 8) Servicios de apariencia de emisión: servicios de emisión

5.1.2. Requisitos de 5G

A partir de estas familias de casos de uso se establecen unos requisitos para la experiencia del usuario que están recogidos en la tabla 5.1:

Caso de uso	Tasa de datos experimentada por el usuario	Latencia E2E	Movilidad
Acceso de banda ancha en áreas densas	DL: 300 Mbps UL: 50 Mbps	10 ms	Por demanda (0-100 Km/h)
Acceso de banda ancha en cualquier lugar	DL: 50 Mbps UL: 25 Mbps	10 ms	Peatonal
Movilidad de usuario más alta	DL: 50 Mbps UL: 25 Mbps	10 ms	Hasta 1000 Km/h
IoT a gran escala	DL: 50 Mbps UL: 25 Mbps	10 ms	Peatonal
Comunicaciones en tiempo real extremas	DL: 50 Mbps UL: 25 Mbps	10 ms	Peatonal
Comunicaciones de emergencia	DL: Desde 50 kbps a 10 Mbps; UL: Desde pocos bps a 10 Mbps	1 ms	Por demanda (0-500 Km/h)
Comunicaciones de máxima confianza	DL: 10 Mbps UL: 10 Mbps	10 ms	Por demanda (0-500 Km/h)
Servicios de apariencia de emisión	DL: Up to 200 Mbps UL: Modest (e.g. 500 kbps)	< 100 ms	Por demanda (0-500 Km/h)

Tabla 5.1. Requisitos de experiencia de usuario 5G [28]

También es un aspecto importante para esta nueva generación la mejora de los dispositivos. Éstos deberán mejorar tanto su software como su hardware en capacidad y en complejidad, incluso llegando a actuar de nodos para otros dispositivos en las nuevas redes dispositivo a dispositivo (D2D).

Se espera que los terminales 5G posean una gran capacidad de programación por parte de la red, de manera que se permita al operador un diagnóstico en tiempo real de las comunicaciones del dispositivo.

Con el objetivo de permitir el *roaming* global, los dispositivos deberán ser capaces de soportar múltiples bandas así como múltiples modos (TDD/FDD/mezcla de ambos). El motivo de las múltiples bandas es el de conseguir elevadas tasas de datos empleando varias bandas simultáneamente. También deberán integrar la agregación de flujos de datos de distintas tecnologías y portadoras.

Otra de las mejoras significativas respecto al 4G que dispondrán los terminales 5G, será un aumento del tiempo de vida de sus baterías a por lo menos 3 días los *smartphones* y hasta 15 años los dispositivos de bajo coste MTC (Machine Type Communication). Para lograr esto se mejorará la eficiencia de señalización en los terminales.

En cuanto a las mejoras de los servicios se están desarrollando los siguientes conceptos:

- **Transparencia de conectividad:** es un aspecto fundamental para una experiencia consistente en un entorno altamente heterogéneo. Las aplicaciones deberán estar conectadas siempre a las tecnologías de acceso radio (RAT) o puntos de acceso (D2D) o una combinación de ambos que garantice la mejor experiencia de usuario.

- Localización: deberá integrarse una red basada en posicionamiento en el espacio tridimensional, que tenga una precisión de 10 a 1 m el 80% de las ocasiones, y menor que 1 m en interiores.
- Seguridad: este servicio ha sido siempre uno de los fundamentales que los operadores proveen a los clientes. Para garantizar la seguridad de la red, se contará con una serie de requisitos como los son: autenticación del suscriptor (similar a la del 4G), privacidad de los usuarios, seguridad más allá del transporte *hop-by-hop* y mejorar la seguridad de la red en general respecto a la cuarta generación.

La resistencia y alta disponibilidad de la red son imprescindibles en el 5G para poder garantizar siempre servicios como los de emergencias o seguridad pública. Se ha fijado en 99.999 el porcentaje de disponibilidad de la red, incluyendo la protección frente a eventos climatológicos. En cualquier caso este requisito depende en última instancia del operador.

La confiabilidad de una red se mide como la cantidad de paquetes entregados satisfactoriamente dentro de una restricción de tiempo que dependerá del servicio, dividida por el número de paquetes enviados. La tasa que se espera cumplir en 5G vuelve a ser del 99.999%.

5.1.3. Tecnología y arquitectura de 5G

A continuación vamos a mostrar en una tabla las capacidades de red pertenecientes a la *release 12* del 3GPP [18] y por otro lado las mejoras que deberán implementar para cumplir los requisitos del NGMN:

Atributo	Capacidad de 3GPP rel.12	Mejora necesaria para cumplir los requisitos del NGMN
Tasa de datos (por usuario)	Hasta 100 Mbps	> x10 (x100 en extremos de las celdas)
Latencia extremo a extremo	10 ms (tip. 50 ms)	> x10 (disminución)
Movilidad	Hasta 350 km/h (en algunas bandas hasta 500 km/h)	> x1.5
Eficiencia espectral	DL: 0.074 – 6.1 b/s/Hz UL: 0.07 – 4.3 b/s/Hz	Aumento sustancial (no definido aún)
Densidad de conexión	Aprox. 2000 usuarios activos/km ²	> x100

Tabla 5.2. Mejoras previstas para 5G en capacidades de red [28]

En la actualidad se están desarrollando una serie de tecnologías y nuevas propuestas para que juntas permitan lograr los requisitos del 5G. Algunas de estas tecnologías/propuestas son el empleo de bandas de frecuencias superiores (por encima de los 6 GHz), la tecnología *full dúplex*, el uso de nuevas formas de onda, nuevas tecnologías de acceso múltiple avanzadas, mejoras de esquemas multiantena y *massive MIMO*, nueva red centrada en el UE, etc. Sin embargo algunas de las tecnologías mencionadas pueden tener efectos adversos sobre el resto, por lo que el verdadero reto de esta nueva situación será lograr la combinación de éstas que permita alcanzar los requisitos marcados por el NGMN.

Una vez vistos los requisitos y las tecnologías que se están desarrollando para satisfacerlos, se precisa de unos principios de diseño para el sistema 5G, éstos pueden dividirse en cuatro grandes grupos atendiendo a la naturaleza de su propósito:

- Radio: en el aspecto radio se precisa de un mejor aprovechamiento del espectro (uso de espacios entre bandas asignadas así como el empleo de bandas de frecuencias superiores), permitir el despliegue de redes densas rentables, coordinación y cancelación de interferencias y apoyar la topología radio dinámica.
- Centro de la red: el núcleo de la red debe ser redefinido como una parte común componible, es decir, que pueda ser integrada por distintos elementos que apoyen la heterogeneidad de la red.
- Extremo a extremo: la red debe tener capacidades y funciones flexibles en la medida de lo posible, además de soportar las nuevas creaciones de valor y mejoras, y por supuesto garantizar la seguridad y privacidad de sus usuarios.
- Operaciones y administración: deberá simplificarse esta parte para que el añadir nuevas funciones y capacidades no se traduzca en una mayor complejidad de las operaciones y la administración de la red.

Establecidos ya los principios de diseño de la red, la NGMN diseñó una arquitectura que pretende aprovechar la separación estructural entre el hardware y el software, así como la programabilidad ofrecida por la arquitectura SDN/NFV que emplea. La propuesta de esta arquitectura resultó como se indica en la figura 5.1.

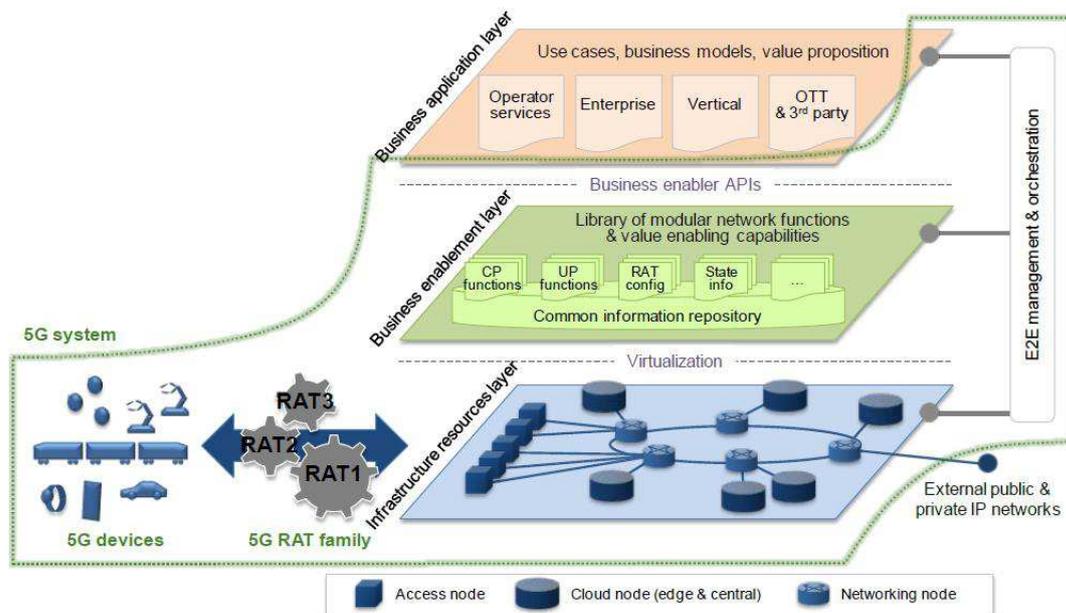


Figure 8: 5G Architecture

Figura 5.1. Arquitectura 5G [28]

La principal novedad que se introduce en la arquitectura 5G es la inclusión del concepto de *Network slice* que hace referencia a cada parte de la red que soporta el servicio de comunicación de un determinado tipo de conexión. Cada *slice* de 5G se compone de una colección de funciones de red y unos ajustes de la RAT específicos combinados para un caso de uso o modelo de negocio. La mejor manera de comprender este concepto es mediante el ejemplo dado en [28] sobre un conjunto de *slices* que operan concurrentemente en la misma infraestructura.

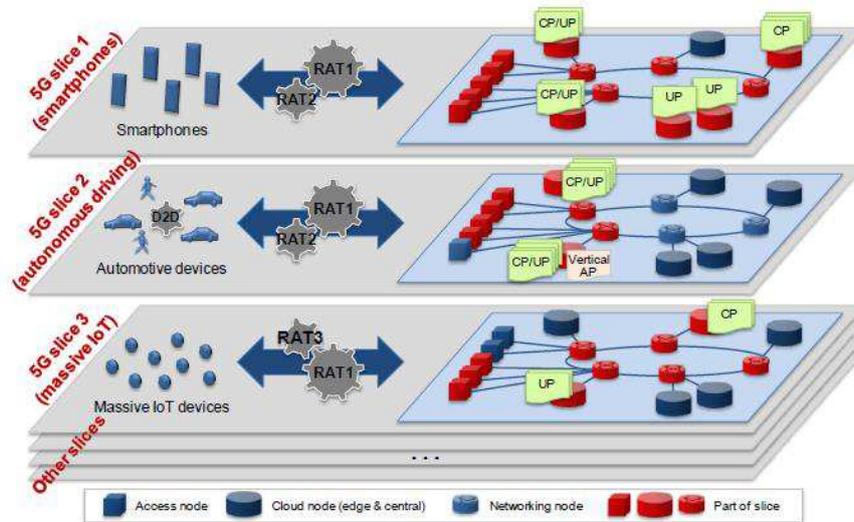


Figura 5.2. Slices 5G en una misma infraestructura [28]

5.1.4. Fechas de despliegue previstas

Es importante establecer un calendario de despliegue a la hora de desarrollar una nueva tecnología debido a que el éxito o fracaso de ésta puede depender de lo tardía que sea su incorporación al mundo. EL NMGN ha establecido una hoja de ruta teniendo en cuenta los tiempos de estandarización, pruebas y ensayos, con el resultado final de que el 5G comience a comercializarse en 2020 con una madurez suficiente. Las fechas previstas son:

- Requerimientos detallados a finales de 2015
- Diseño del sistema inicial listo en 2017
- Comienzo de ensayos en 2018
- Estandarización lista en 2018
- Sistema comercial listo en 2020

Conviene señalar que estas son las fechas previstas por la NGMN, pero el lanzamiento del 5G en cada país dependerá en última instancia de los operadores.

5.2. Bandas de frecuencia candidatas para 5G

Actualmente no hay un consenso sobre las bandas de frecuencia que van a emplearse en 5G, sin embargo, sí que lo hay en que para satisfacer los servicios de esta nueva tecnología será necesario el uso del espectro por encima de 6 GHz (ondas milimétricas).

Son numerosas las compañías e institutos de investigación que se encuentran hoy en día realizando estudios sobre el comportamiento de las ondas en este tipo de bandas, con el objetivo de determinar cuáles serán las mejores para ofrecer los servicios de la quinta generación. En este apartado vamos a intentar reunir los datos que se conocen hasta la fecha sobre las bandas en las que se ha priorizado el estudio.

5.2.1. Escenarios posibles y factores limitantes

Aunque la mayoría de los aspectos de la nueva generación de móviles se encuentran en fase de desarrollo, sí que hay algunos claros con respecto a los escenarios de ondas milimétricas. En concreto los sistemas de 5G deberán proporcionar un elevado ancho de banda mediante células pequeñas en puntos con elevada densidad de usuarios. Por lo tanto el foco de la industria se ha centrado en exteriores o en grandes espacios públicos de interior, así como en domicilios con cobertura Wi-Fi (actualmente en 2.4 GHz y 5 GHz y en un futuro con WiGig en 60 GHz).

En la fase I del proyecto METIS [36], se contemplan 5 casos de escenarios con 12 casos de uso. Aunque no están enfocados tan específicamente como los vistos hasta ahora, conviene señalarlos. Cada uno de los cinco escenarios cumple con al menos uno de los objetivos del 5G. Los nombres otorgados a cada uno de ellos con una breve explicación se exponen a continuación:

- *Amazingly fast*: escenarios con velocidades de datos muy elevadas para los futuros servicios de banda ancha.
- *Great service in a crowd*: se concentra en proporcionar un buen ancho de banda en zonas con una alta densidad de usuarios.
- *Ubiquitous things communicating*: focalizado en manejar de manera eficiente un gran número de dispositivos (incluyendo máquinas y sensores) con requerimientos variables.
- *Best experience follows you*: se concentra en garantizar una buena experiencia de movilidad.
- *Super real-time and reliable connections*: escenarios que garanticen la fiabilidad y un retardo mínimo en la comunicación.

También han sido definidos doce casos de uso basándose en estos escenarios para facilitar el trabajo de investigación con objetivos más específicos. La figura 5.3 muestra los 5 escenarios con los 12 casos de uso propuestos:

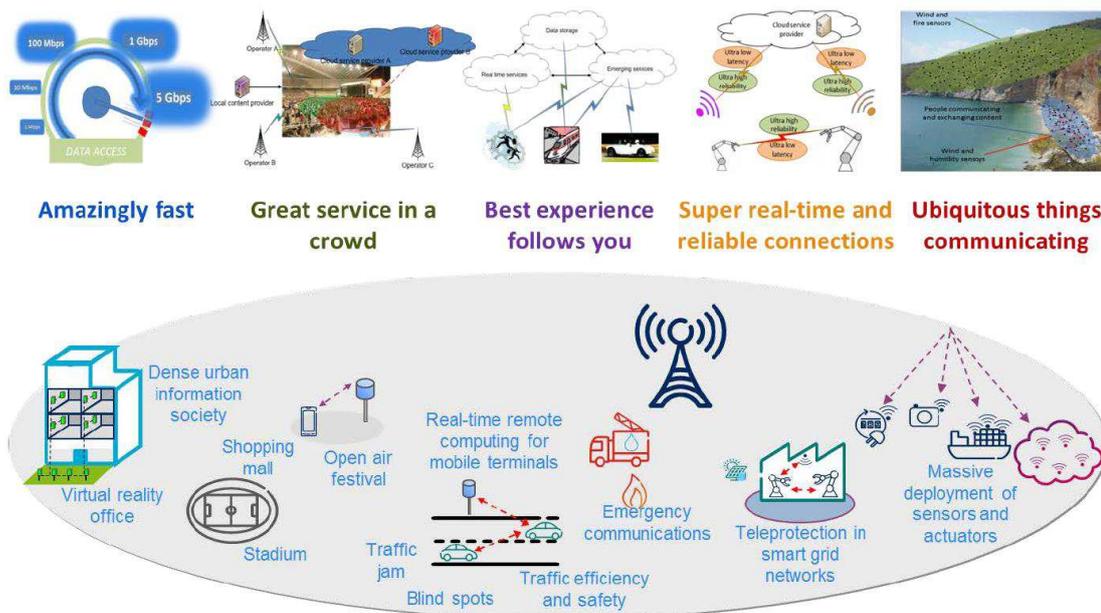


Figura 5.3. Escenarios y casos de uso propuestos por el METIS [36]

A partir de los escenarios y casos de uso vistos, los entornos típicos que se suelen considerar a la hora de definir el nuevo modelo de canal son [34]:

- Urban Micro (UMi) Street Canyon and Open Square with outdoor to outdoor (O2O) and outdoor to indoor (O2I). Representa las calles de las ciudades y sus plazas. Las pérdidas en trayectos LOS se ajustan al modelo de espacio libre de Friis. Al igual que ocurría en las bandas por debajo de los 6 GHz, en situaciones NLOS aumenta el exponente de pérdidas. En medidas realizadas el ensombrecimiento es similar al de las bandas de frecuencia inferiores.



Figura 5.4. UMi Street Canyon (izquierda) UMi Open Square (derecha) [34]

- Indoor (INH) Open and closed Office, Shopping Malls. Representa el interior de los edificios, así como oficinas y centros comerciales. En condiciones LOS, las múltiples reflexiones en paredes, suelo y techo hacen aumentar el efecto guía de ondas. Las medidas realizadas dan como resultado un exponente de pérdidas menor que 2 (mejor que el modelo de Friis). El exponente de pérdidas parece aumentar suavemente a medida que lo hace la frecuencia posiblemente debido a la relación entre la longitud de onda y la rugosidad de la superficie. Estudios recientes [Karttunen EuCAP2015] han demostrado que la discriminación de polarización se sitúa entre los 15 y los 25 dB, con una mayor discriminación de polarización en 73 que en 28 GHz.

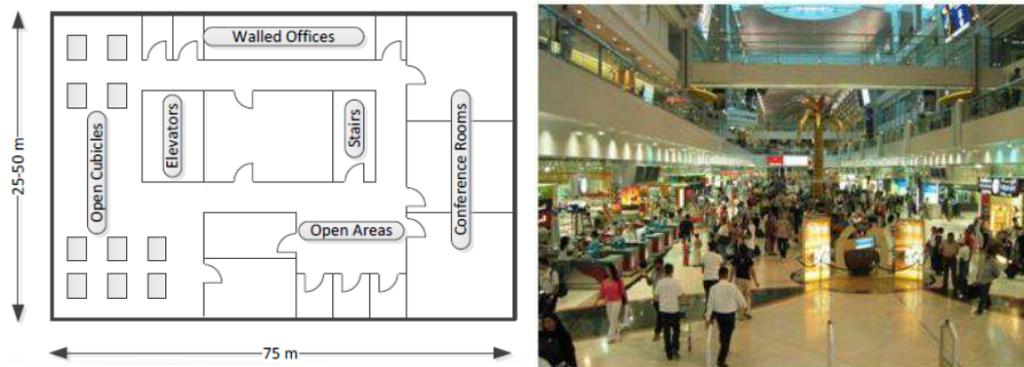


Figura 5.5. Típico interior de oficina (izquierda) y centro comercial (derecha) [34]

- Urban Macro (UMa) with O2O and O2I. Escenarios de más de 200 m de radio con los puntos de acceso montados en las azoteas.

Al igual que en los escenarios UMi, en situación LOS el comportamiento es muy similar al modelo de Friis, pero para NLOS la tendencia de las pérdidas resulta inconclusa para un buen rango de frecuencias. Según aumentamos la frecuencia la difracción deja de afectar de manera considerable a la propagación, haciendo dominantes a los efectos de reflexión y dispersión.



Figura 5.6. Montaje sobre azotea en escenario UMa [34]

En las nuevas bandas de frecuencia de ondas milimétricas la propagación es muy direccional y la cobertura se consigue mediante situaciones LOS o reflexiones múltiples, a diferencia de la mayor cobertura conseguida a frecuencias inferiores debido a la difracción en obstáculos.

Las comunicaciones en un entorno denso urbano precisarán de reflexiones para rodear obstáculos como la vegetación, ya que las capacidades de difracción y penetración son menores a elevadas frecuencias.

Para estas nuevas bandas hay una serie de barreras que no pueden ser evitadas mediante el uso de nuevas tecnologías. Algunas de estas limitaciones son:

Atenuación atmosférica

Teniendo en cuenta que el objetivo de cobertura es de sólo unas centenas de metros, efectos como las pérdidas atmosféricas, el desvanecimiento por lluvia o las pérdidas por penetración, no favorecen ninguna banda en particular sobre otra (ni siquiera en los picos de absorción del oxígeno y el agua a 60 GHz y 120 GHz). Por el contrario, los sistemas de largo alcance (radioenlaces o satélites) sí se ven afectados por este tipo de barreras.

En otras palabras, las ventajas e inconvenientes de una banda sobre otra basándonos en este tipo de fenómenos atmosféricos, no son el factor más relevante para decidirnos por una u otra.

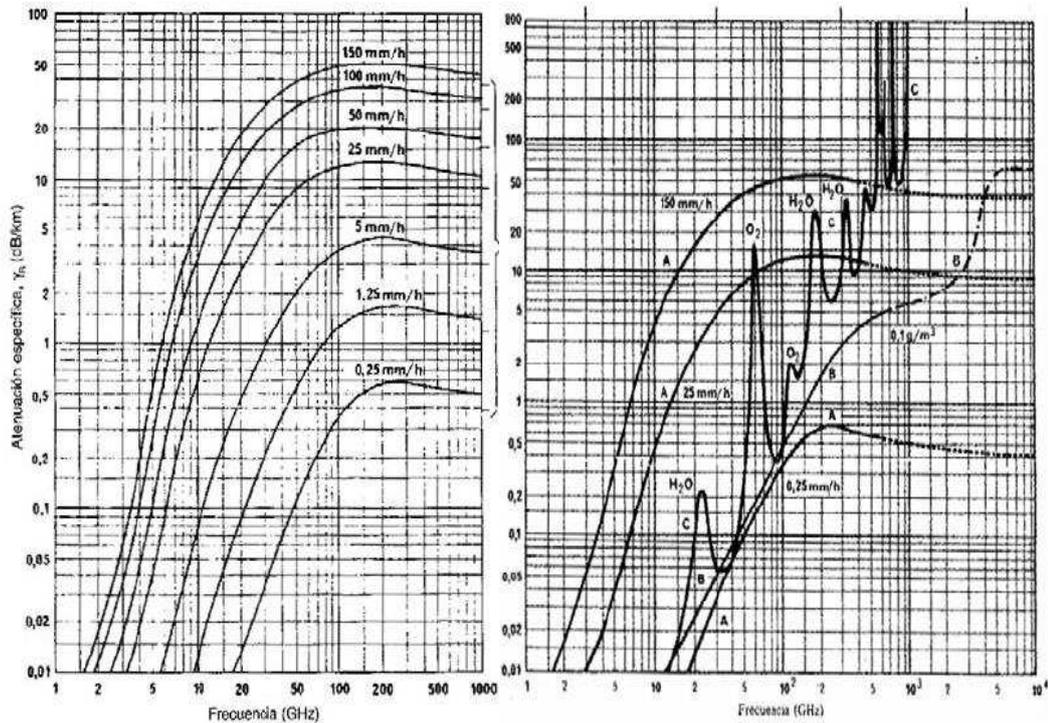


Figura 5.7. Atenuación específica por lluvia (izquierda) y por gases (derecha) [34]

Mecanismo de propagación

Para la propagación de las ondas milimétricas existe un criterio unificado que determina que deberá ser en situación de visión directa (LOS). Incluso en las frecuencias inferiores a 6 GHz la propagación suele ser debida a la reflexión antes que a la difracción.

Pérdidas por penetración en edificios

Este tipo de atenuación ha sido medida en frecuencias hasta 6 GHz y, más recientemente, en las frecuencias de 28, 38 y 73 GHz. Las pérdidas por penetración suelen ser del orden de 10 dB en UHF, aumentan a 15 dB a 1800 MHz y 20 dB a 5 GHz, y la tendencia sigue siendo ascendente a medida que aumenta la frecuencia (40 dB en 28 GHz). Esta es la razón por la que las ondas milimétricas se propagan de forma más eficiente mediante las reflexiones en los obstáculos.

Como los sistemas interiores y exteriores deberán estar debidamente aislados, será necesario también el uso del espectro de alta frecuencia en ambientes interiores, al igual que en el exterior.

5.2.2. Rangos de frecuencia considerados

En algunos estudios sobre las nuevas bandas de frecuencia para 5G [33], se ha optado por dividir el espectro por encima de los 6 GHz en tres rangos de frecuencias más manejables, basándose en los requisitos destacados por las partes interesadas de la industria. La propagación en todas estas bandas de frecuencia será en situación LOS. Por lo tanto el espectro quedará dividido en los tres siguientes rangos:

➤ 6 – 30 GHz

La parte atractiva de este rango de frecuencias es que la tecnología y arquitectura existentes pueden ser adaptadas para trabajar a estas frecuencias, que se encuentran cerca de las utilizadas hoy en día por los sistemas celulares.

Uno de los límites que encontramos en este rango es el de la banda Ka (26,5 a 40 GHz) que se emplea en comunicaciones vía satélite. El empleo de esta banda debe ser compartido con otro tipo de sistemas como los fijos o por satélite.

Como hemos señalado anteriormente, el especial interés por este rango es la capacidad de integración de tecnologías existentes con el mínimo desarrollo adicional posible. Estudios realizados en estas frecuencias señalan como mecanismo dominante de la propagación en entornos urbanos la reflexión antes que la difracción.

➤ 30 – 100 GHz

Este rango de frecuencias alberga en su interior un pico de absorción del oxígeno a 60 GHz, lo que llevó a la banda de alrededor de 60 GHz a estar exenta de licencias. Aprovechando esta situación, el protocolo IEEE 802.11ad (sistemas WiGig) se ha desarrollado para operar a estas frecuencias.

La compartición de esta parte del espectro deberá realizarse con sistemas fijos pero no con satélites. El ancho de banda disponible en este rango es bastante mayor que en los inferiores, con una menor preocupación por la coexistencia con otras tecnologías.

Este rango contiene la banda de frecuencias sin licencia de 60 GHz alrededor del pico de absorción del oxígeno, así como las bandas de 70 y 80 GHz con pocas licencias otorgadas. Aunque existe una preocupación sobre los límites de la ganancia de las antenas, los sistemas 5G seguramente podrán operar en la banda de 60 GHz.

➤ Superior a 100 GHz

Esta banda también contiene picos de absorción de agua y oxígeno. Los enlaces punto a punto fueron probados cerca de los 120 GHz (primer pico de absorción del oxígeno) en las Olimpiadas de Pekín 2008 llegando a transportar múltiples canales HDTV a 11 Gbps. El especial interés de este rango reside en los grandes anchos de banda que permite alcanzar, en un futuro se pretende llegar a la región de THz que permitiría transmisiones de 100 Gbps. La propagación en este rango es muy direccional y es necesario reservar un espacio para otros propósitos (por ejemplo radioastronomía).

5.2.3. Bandas prioritarias

En el estudio al que nos hemos referido antes [33], se establecen una serie de bandas de frecuencia como candidatas para la quinta generación teniendo en cuenta cinco características:

- 1) Disponibilidad de un elevado ancho de banda
- 2) Baja utilización por parte del titular
- 3) Potencial de armonización (compatibilidad con otras tecnologías que empleen el mismo espectro de frecuencia)
- 4) Posibilidad de implantación de economías de escala
- 5) Facilidad de integración en móviles

Basándose en estos parámetros se determinan 5 bandas para priorizar su estudio. Todas ellas se encuentran en el rango de los 30 a los 100 GHz establecido con anterioridad. Las bandas prioritarias y los usos que integran en Europa y a nivel global se exponen en la tabla 5.3:

Banda [GHz]	Europa	Global
66 – 71	Sin uso	Sin uso pero asignado a GNSS, ISS
45.5 – 48.9	45.5-47 sin uso; 47.2-47.5 HAPS; 47.5-47.9 HDFSS DL R1; 47.9-48.2 HAPS; 48.2-48.54 HDFSS DL R1;	47-47.2 Am, AmSat; PMSE no es global
40.5 – 43.5	Abierto a FSS	40.5-42.5 FSS DL; 42.5-43.5 FSS UL
71 – 76; 81 – 86	Enlaces fijos PtP 81-84 OTAN type F (uso futuro)	Enlaces fijos PtP 71-76 FSS DL (71-74 MSS); 81-86 FSS UL (81-84 MSS); 74-76 BS, BSS, SRS (s-E); 75.5-76 Am, AmSat
57 – 66	Datos de banda ancha	59-64 común para datos de banda ancha

Tabla 5.3. Uso de las bandas prioritarias [33]

Llegados a este punto hemos concluido que para distancias cortas (inferiores a 200 m), las barreras atmosféricas (absorción por gases, desvanecimiento por lluvia, etc) no son un factor limitante hasta al menos los 100 GHz. Sin embargo, dado que las antenas direccionales son apropiadas para todas las frecuencias superiores a los 6 GHz, se ha optado por escoger bandas superiores a 30 GHz que permitan integrar fácilmente en los móviles arrays de antenas direccionales. A continuación se han escogido, dentro del rango de los 30 a 100 GHz, las bandas prioritarias fijando un ancho de banda de al menos 1 GHz de acuerdo con los requisitos necesarios para los escenarios estudiados.

5.3. Modelos de canal 5G

Como hemos visto, se espera que los nuevos sistemas 5G operen en frecuencias por encima de los 6 GHz, lo que hace necesaria la definición de nuevos modelos de canal que cubran aspectos de la propagación a estas frecuencias. En el apartado 4.3.2 hemos visto el modelo de canal 3D del 3GPP [18] que incorporaba una nueva dimensión de elevación a los ya existentes. Es importante que el nuevo modelo de canal sea válido para operar a elevadas frecuencias (por ejemplo 100 GHz) y que permita evaluar las posibles futuras especificaciones técnicas sobre un conjunto representativo de entornos y escenarios de interés. Además deberá ser consistente con los modelos ya existentes para frecuencias por debajo de los 6 GHz.

Hay numerosos proyectos de investigación con el objetivo de medir y modelar el canal 5G. Uno de ellos es el METIS2020, cuya primera fase se ha centrado en bandas de frecuencia de hasta 86 GHz, con anchos de banda muy elevados, totalmente en 3 dimensiones y con modelado preciso de la polarización, modelado de ondas esféricas y elevada resolución espacial. Otro proyecto es el COST2100, cuyo modelo de canal es un GSCM (Geometry-based Stochastic Channel

Model) que es capaz de reproducir las propiedades estocásticas de los canales MIMO sobre el tiempo, frecuencia y espacio. Por otra parte, 5G mmWave Channel Model Alliance pretende formular pautas de metodología y calibración de medidas, metodología de modelado, así como la parametrización en varios entornos. NYU WIRELESS ha publicado numerosas medidas en entornos urbanos a frecuencias de 28, 38 y 73 GHz para canales de interior y de exterior.

5.3.1. Requerimientos del nuevo modelo de canal

Para la confección de un nuevo modelo de canal, lo primero que hay que definir son los requisitos que ha de cumplir. Según la guía publicada recientemente en la web de documentos sobre 5G de MCHFB (Mobile Communications in Higher Frequency Bands) [34], los requisitos son:

- 1) El nuevo modelo de canal deberá preferiblemente estar basado en el modelo ya existente de canal 3D, pero con extensiones que permitan satisfacer los nuevos requisitos de 5G, como por ejemplo:
 - a) Los arrays de antenas serán muy probablemente 2D y polarizados en el punto de acceso y en el UE, por lo tanto necesitarán ser modelados correctamente los ángulos de azimut y elevación.
 - b) Cada elemento individual de la antena tendrá patrones de radiación en azimut y elevación y requerirán modelos separados para el desarrollo direccional de las ganancias.
- 2) El nuevo modelo de canal deberá servir para un ancho espectro de frecuencia de hasta 100 GHz. La conjunción de las características de propagación sobre diferentes bandas de frecuencia deberán ser tenidas en cuenta para las operaciones multibanda.
- 3) El nuevo modelo de canal deberá soportar elevados anchos de banda de canal (de hasta 2 GHz) donde:
 - a) Los anchos de banda individuales de canal estarán en el rango de los 100 MHz a los 2 GHz y deberán soportar la agregación de portadoras.
 - b) Los canales operativos podrán estar dispersos en un rango asignado de varios GHz.
- 4) El nuevo modelo de canal debe soportar una amplia gama de arrays de antenas, en particular:
 - a) Algunos arrays de antenas tendrán una directividad muy alta con una resolución angular del canal de alrededor de 1 grado.
 - b) El 5G tendrá distintos tipos de arrays de antenas, como por ejemplo, lineales, planas, cilíndricas o esféricas, con arbitrariedad de polarización.
 - c) El vector del array puede cambiar de forma significativa cuando el ancho de banda es grande comparado con la frecuencia de portadora.
- 5) El nuevo modelo de canal deberá contemplar la movilidad, en particular:
 - a) La estructura del modelo de canal deberá poder manejar movilidades de hasta 350 km/h.

- b) La estructura del modelo de canal deberá ser adecuada para una movilidad a pequeña escala y rotación para los dos extremos del enlace, de manera que se contemplen casos de comunicación dispositivo a dispositivo (D2D) o vehículo a vehículo (V2V).
- 6) El nuevo modelo de canal debe asegurar la consistencia espacial, temporal y frecuencial, en particular:
 - a) El modelo deberá proveer consistencia espacial, temporal y frecuencial que pueden ser caracterizadas, por ejemplo, a través de la consistencia espacial obtendremos correlación entre bandas de frecuencia.
 - b) El modelo deberá también asegurar los estados del canal (LOS o NLOS) para localizaciones de interior o exterior, estadísticas de segundo orden del canal y suaves cambios del canal en función del tiempo, posición de las antenas y la frecuencia en todos los escenarios.
 - c) Las consistencias espaciales, temporales y frecuenciales deberán ser soportadas por simulaciones donde impacten los resultados (massive MIMO, movilidad, seguimiento del haz, etc.).
- 7) El nuevo modelo de canal deberá ser de complejidad computacional práctica, en particular:
 - a) El modelo deberá ser adecuado para implementar herramientas de simulación de enlace simple y de multiceldas, así como herramientas de simulación de redes multienlace. La complejidad computacional y requisitos de memoria no deberá ser excesiva.
 - b) La introducción de una nueva metodología de modelado (modelo basado en mapas) puede complicar el mecanismo de generación de canal y esto aumenta sustancialmente la complejidad de implementación del simulador de nivel del sistema.

5.3.2. Modelos de canal disponibles

Para la quinta generación de comunicaciones móviles será necesario un modelo de canal basado en los ya existentes modelos de canal estocásticos basados en geometría (GSCM). Estos modelos son populares en parte por su escalabilidad y razonable complejidad. Algunos de estos modelos vienen recogidos en un estudio sobre el modelo de canal de 5G [35]:

WINNER/IMT-Advanced

Ambos modelos contemplan un conjunto de escenarios diferentes que van desde los de interior a una amplia variedad de interior a exterior y exteriores. La parametrización de estos modelos tuvo lugar tras una serie de campañas de medidas de canal (como el ejemplo del punto 5.3.4). Las primeras implementaciones tenían parametrizaciones en dos dimensiones solamente, mientras que las posteriores contaron con la dimensión de elevación. Algunos de estos parámetros de menor escala son los ángulos de salida y llegada de los rayos, el retardo de propagación y la potencia. Los de gran escala como el *shadowing* y el retardo de dispersión evolucionan más suavemente.

La extensión de los modelos del WINNERII/+ es conocida como Quadriga y consiste en un modelo totalmente en 3D con polarización geométrica y que puede ser utilizado tanto para canales terrestres como para comunicaciones por satélite. Este modelo soporta la evolución temporal continua para enlaces con una sola estación base con desvanecimientos.

Los modelos GSCM no son consistentes espacialmente, lo que quiere decir que no soportan totalmente el movimiento continuo más allá de intervalos fijos. La asunción de onda plana hace que también se asuma que los arrays de antenas son suficientemente pequeños para que todos los elementos experimenten los mismos parámetros de gran escala. Esta condición no puede ser asumida por los requisitos del 5G. Otra de las características de los modelos GSCM es que la mayoría están hechos para la planificación celular con estaciones fijas, por lo que no cubrirían los enlaces dispositivo a dispositivo (D2D). Por supuesto otra de las características es que fueron desarrollados para las frecuencias que se emplean en la actualidad (no para ondas milimétricas).

COST 2100

El modelo COST 2100 está estrechamente relacionado al modelo anterior porque ambos tienen el mismo origen. Este modelo sin embargo soporta la evolución no estacionaria y continua del canal radio. Si un UE está dentro de una región de visibilidad de una agrupación de celdas (cluster), la señal se propagará por ellas. Contempla dos tipos de *clusters*, diferenciándolos por si soportan la técnica del rebote.

Este modelo soporta el modelado de ondas esféricas y también la consistencia espacial mediante *clusters* localizados geográficamente y sus correspondientes regiones de visibilidad. Sin embargo, el modelo no contempla los casos de movilidad en los dos extremos del enlace y no puede ser aplicado al D2D. También es complicado parametrizar este modelo en distintos entornos a partir de medidas realizadas, porque los parámetros como las propiedades de los *clusters* no son fáciles de extraer de las medidas.

IEEE 802.11 para 60 GHz

El modelo de canal IEEE 802.11 ad está pensado para redes de área local inalámbricas (WLANs) en las que se requiere una elevada tasa de datos. El modelo describe el canal proporcionando características espaciotemporales precisas incluyendo la polarización y el soporte al *beamforming* y a las características no estacionarias del canal. Como resultado de medidas experimentales y simulaciones de trazado de rayos, el modelo es parametrizado para tres escenarios de interior, denominados cuarto de conferencias, cubículo y salón. Sin embargo, como los parámetros del modelo son determinados de manera determinística, la parametrización de cada escenario es única y no puede ser extrapolada a otros escenarios similares.

Modelo de canal del METIS

El modelo de canal final del METIS estará basado en los modelos previos WINNERII y WINNER+ en la medida de lo posible. Las extensiones y modificaciones que se requieran procederán de campañas de medidas. Las principales modificaciones serán el rango de frecuencias, la consistencia espacial, una tercera dimensión (elevación) y la introducción de ondas esféricas.

➤ Rango de frecuencias

El modelo WINNERII/+ y el IMT-Advanced fueron diseñados para frecuencias por debajo de los 6 GHz. El nuevo modelo del METIS deberá cubrir el rango de frecuencias que va desde los 380 MHz a los 86 GHz. Debido al extremadamente largo rango de frecuencias y a la limitación de disponibilidad de sondas de canal, sólo podrán ser tomadas medidas en algunas frecuencias concretas. El resto de medidas deberán ser rellenadas mediante simulaciones e interpolación.

➤ Consistencia espacial

Para obtener la consistencia espacial será necesario definir la localización espacial del *cluster* (coordenadas) y el tiempo de vida de su región de visibilidad. Para el caso de un único rebote, el retardo y los ángulos de salida y llegada dependen unos de otros de acuerdo a la geometría. Sin embargo, en el caso de múltiples rebotes son independientes.

Cuando el transmisor o el receptor se mueven una distancia corta, los ángulos y el retardo son ajustados basándose en la geometría. En movimientos mayores la localización del *cluster* debe ser actualizada dependiendo de su región de visibilidad.

Cuando un dispositivo se está moviendo, los *clusters* se actualizan individualmente dependiendo de sus regiones de visibilidad. Para el caso de un único rebote el transmisor y el receptor se encuentran dentro de la misma región de visibilidad, mientras que para el de rebote múltiple cada uno tiene la suya propia.

Esta aproximación permite la movilidad de ambos extremos (EBs móviles, D2D) y la evolución temporal suave de los parámetros de gran y pequeña escala.

➤ Extensión 3D

La extensión del modelo a 3D sigue los principios del 3GPP y fue vista en el apartado 4.3.3.2. Queda por modelar de forma más precisa la difracción por encima de los edificios en los casos de macroceldas.

➤ Ondas esféricas

Para tener en cuenta las ondas esféricas en el modelo de canal podría formularse una ecuación de manera muy similar a la de las ondas planas, y el canal entre la antena transmisora n y la antena receptora m quedaría definido mediante la ecuación 5.1:

$$H_{mn} = \sum_{l=1}^N g_m^{rx} (-k_{lmn}^{rx})^T \cdot A_l \cdot g_n^{tx} (k_{lmn}^{tx}) \cdot \exp[i(k_{lmn}^{rx} \cdot [r_m^{rx} + t \cdot v^{rx}] - k_{lmn}^{tx} \cdot [r_m^{tx} + t \cdot v^{tx}] + [\omega + \omega_{lmn}^D] \tau_{lmn})] \quad (5.1)$$

Donde:

A_l : matriz de amplitud polarimétrica compleja de la l -ésima onda esférica (N en total)
 $g_m^{rx}(-k_l^{rx})$ y $g_n^{tx}(k_l^{tx})$: vectores de patrón de antena polarimétrica complejos que corresponden a los vectores de onda k_{lmn}^{rx} y k_{lmn}^{tx}
 r_m^{rx} y r_m^{tx} : vectores de posición de los elementos de las antenas transmisora y receptora respecto a un punto de referencia en ellas
 ω : frecuencia angular
 ω_{lmn}^D : frecuencia Doppler
 τ_{lmn} : retardo de propagación entre los elementos de la antena transmisora y receptora

5.3.3. Modelos de propagación propuestos para 5G

Actualmente no existe un único modelo de propagación por escenario ni situación LOS/NLOS, por lo que vamos a ver tres modelos que pueden aplicarse a los escenarios descritos anteriormente con el objetivo de ver cómo se comportan en cada uno de ellos. Los modelos de propagación expuestos son [34]:

- Close-in (CI) free space reference distance path loss model [43][38]
- Close-in free space reference distance model with frequency-dependent path loss exponent (CIF) [38][44]
- Alpha-Beta-Gamma (ABG) path loss model [38] [44]

El modelo ABG es uno de los que se utilizan hoy en día para el modelo 3GPP 3D pero añadiendo dependencias con la altura de la estación base y con un punto de ruptura LOS. El objetivo de las investigaciones es definir un único modelo de propagación por escenario y diferente situación LOS/NLOS, pero esta elección se encuentra todavía en fase de discusión.

Las ecuaciones que modelan la pérdida básica de cada modelo son:

Modelo CI PL (Close-in free space reference distance path loss)

Se trata del modelo de pendiente de pérdidas con la distancia visto en el punto 3.4.1 aplicando como distancia de referencia 1 m. Este modelo solo necesita que sea determinado un parámetro, la pendiente de pérdidas, a través de la optimización para minimizar la desviación estándar del desvanecimiento por ensombrecimiento sobre el conjunto de datos medidos del modelo de pérdidas. En el modelo CI PL hay un punto que enlaza la pérdida básica con la pérdida en espacio libre a la distancia de 1 m, e indica la dependencia con la frecuencia del modelo de pérdidas.

Modelo CIF (Close-in free space reference distance model with frequency-dependent path loss exponent)

$$PL [dB] = L_0 + 10 \cdot n \left(1 + b \left(\frac{f - f_0}{f_0} \right) \right) \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma^{CIF} \quad (5.2)$$

Donde:

L_0 : pérdidas en espacio libre a la distancia de referencia (d_0) de 1 m

n : exponente de pérdidas

b : parámetro de optimización de la pendiente

X_σ^{CIF} : desvanecimiento por ensombrecimiento

f_0 : frecuencia de referencia fija. Determinada como la ponderación de la suma de diferentes frecuencias mediante la expresión 5.3:

$$f_0 = \frac{\sum_{k=1}^K f_k N_k}{\sum_{k=1}^K N_k} \quad (5.3)$$

k : número de frecuencias únicas

N_k : número de puntos calculados del modelo para la k -ésima frecuencia

Este modelo cuenta con 2 parámetros de optimización (n y b) y es una extensión del anterior que se convierte en el mismo cuando $b = 0$ para múltiples frecuencias, o cuando $f = f_0$ para una sola.

Modelo ABG (Alpha-Beta-Gamma path loss model)

$$PL [dB] = 10 \cdot \alpha \cdot \log d + \beta + 10 \cdot \gamma \cdot \log f + X_\sigma^{ABG} \quad (5.4)$$

Donde:

α : pendiente de pérdidas con la distancia

β : valor de offset flotante

γ : coeficiente de variación de pérdidas con la frecuencia

X_σ^{ABG} : factor de ensombrecimiento

En este caso contamos con 3 parámetros (α, β, γ) que deberán ser optimizados para minimizar la desviación estándar del factor por ensombrecimiento del conjunto de datos.

Para interiores se emplean modelos de doble pendiente para distintas zonas del escenario. En caso de NLOS, pueden considerarse los modelos de doble pendiente ABG y CIF (cada uno de ellos requiere de 5 parámetros de optimización), y el modelo CIF de una sola pendiente para un caso especial de interior de oficina [45]. Los modelos de doble pendiente también pueden utilizarse en interiores con grandes distancias o centros comerciales. Las ecuaciones 5.5 y 5.6 determinan su pérdida básica de propagación:

Modelo de doble pendiente CIF

$PL [dB] =$

$$\left\{ \begin{array}{ll} L_0 + 10 \cdot n_1(1 + b_1(\frac{f-f_0}{f_0})) * \log(\frac{d}{d_0}) & 1 < d \leq d_{BP} \\ L_0 + 10 \cdot n_1(1 + b_1(\frac{f-f_0}{f_0})) * \log(\frac{d_{BP}}{d_0}) + 10 \cdot n_2(1 + b_2(\frac{f-f_0}{f_0})) * \log(\frac{d}{d_{BP}}) & d > d_{BP} \end{array} \right. \quad (5.5)$$

Modelo de doble pendiente ABG

$$PL [dB] = \begin{cases} \alpha_1 * 10 \log d + \beta_1 + \gamma * 10 \log f & 1 < d \leq d_{BP} \\ \alpha_1 * 10 \log d_{BP} + \beta_1 + \gamma * 10 \log f + \alpha_2 * 10 \log \left(\frac{d}{d_{BP}}\right) & d > d_{BP} \end{cases} \quad (5.6)$$

Los canales de propagación en interiores experimentan un aumento del exponente de pérdidas al aumentar también la frecuencia, mientras que en el caso de los exteriores no son muy dependientes de ella.

La tabla 5.4 muestra los parámetros que se emplean en cada modelo dependiendo del escenario en el que nos encontremos. En el caso del modelo ABG en condiciones LOS para los escenarios UMa y UMi, el parámetro α es casi idéntico a la pendiente de pérdidas del modelo CI y también el parámetro γ está muy próximo a 2, lo que indica que tiene lugar la propagación en espacio libre, y está contemplado en los modelos CI y CIF dentro del primer metro de la propagación en espacio libre.

Escenario	Parámetros de los modelos CI/CIF	Parámetros del modelo ABG
UMa- LOS	n=2.0, $\sigma_{SF} = 4.1$ dB	NA
UMa- nLOS	n=3.0, $\sigma_{SF} = 6.8$ dB	$\alpha=3.4, \beta =19.2, \gamma =2.3, \sigma_{SF} = 6.5$ dB
UMi-Street Canyon-LOS	n=2.1, $\sigma_{SF} = 3.76$ dB	NA
UMi-Street Canyon-nLOS	n=3.17, $\sigma_{SF} = 8.09$ dB	$\alpha=3.53, \beta =22.4, \gamma =2.13, \sigma_{SF} = 7.82$ dB
UMi-Open Square-LOS	n=1.85, $\sigma_{SF} = 4.2$ dB	NA
UMi-Open Square-nLOS	n=2.89, $\sigma_{SF} = 7.1$ dB	$\alpha=4.14, \beta =3.66, \gamma =2.43, \sigma_{SF} = 7.0$ dB
InH-Indoor Office-LOS	n=1.73, $\sigma_{SF} = 3.02$ dB	NA
InH-Indoor Office-nLOS single slope (FFS)	n=3.19, b=0.06, $f_0= 24.2$ GHz, $\sigma_{SF} = 8.29$ dB	$\alpha=3.83, \beta =17.30, \gamma =2.49, \sigma_{SF} = 8.03$ dB
InH-Indoor-Office nLOS dual slope	$n_1=2.51, b_1=0.12, f_0= 24.1$ GHz, $n_2=4.25, b_2=0.04, d_{BP} = 7.8$ m, $\sigma_{SF}=7.65$ dB	$\alpha_1=1.7, \beta_1=33.0, \gamma =2.49, d_{BP} = 6.90$ m, $\alpha_2=4.17, \sigma_{SF} = 7.78$ dB
InH-Shopping Malls-LOS	n=1.73, $\sigma_{SF} = 2.01$ dB	NA
InH-Shopping Malls-nLOS single slope (FFS)	n=2.59, b=0.01, $f_0= 39.5$ GHz, $\sigma_{SF} = 7.40$ dB	$\alpha=3.21, \beta =18.09, \gamma =2.24, \sigma_{SF} = 6.97$ dB
InH-Shopping Malls-nLOS dual slope	$n_1=2.43, b_1=-0.01, f_0= 39.5$ GHz, $n_2=8.36, b_2=0.39, d_{BP} = 110$ m, $\sigma_{SF} = 6.26$ dB	$\alpha_1=2.9, \beta_1=22.17, \gamma =2.24, d_{BP} = 147.0$ m, $\alpha_2=11.47, \sigma_{SF} = 6.36$ dB

Tabla 5.4. Parámetros de los modelos CI, CIF y ABG para distintos escenarios [34]

Otro de los aspectos importantes relacionados con las pérdidas del trayecto es el desvanecimiento por ensombrecimiento. Para escenarios *indoor* con densidad de usuarios elevada la dependencia con la distancia y la frecuencia es significativa en condiciones NLOS.

Escenarios	LOS/NLOS	Modelos		Valor [dB]	Rango de frecuencia	Rango de distancia
Interior de oficina	LOS	CI		3	2.44 – 73 GHz	1 – 73 m
	NLOS	Pendiente única	ABG	$\min(3.20 \cdot \log(f) + 3.38 \cdot \log(d), 12.5)$		1 – 86 m
			CIF	$\min(2.59 \cdot \log(f) + 4.10 \cdot \log(d), 12.6)$		
		Doble pendiente	ABG	$\min(2.37 \cdot \log(f) + 3.88 \cdot \log(d), 11.9)$		
			CIF	$\min(2.35 \cdot \log(f) + 3.64 \cdot \log(d), 11.4)$		
	LOS	CI		2		2.9 – 63 GHz
NLOS	Pendiente única	ABG	$\min(4.62 \log(d), 10.9)$	2-229 m		
		CIF	$\min(4.94 \log(d), 11.7)$			
	Doble pendiente	ABG	$\min(2.41 + 2.49 \log(d), 9)$			
		CIF	$\min(2.77 + 2.15 \log(d), 9)$			

Tabla 5.5. Desvanecimiento por ensombrecimiento en interiores [34]

5.3.4. Ejemplo de análisis y medidas en 5G en escenarios reales

A continuación vamos a ver un ejemplo de un estudio llevado a cabo en las ciudades de Nueva York y Austin con el objetivo de establecer un modelo de propagación para las frecuencias de 28 y 38 GHz [37]. El motivo de escoger estas frecuencias no es otro que el de minimizar la absorción atmosférica, aunque hayamos visto que no es de los factores más determinantes. Para este estudio se emplearon celdas de 200 m de radio y antenas con un ancho de haz de 10°, con los usuarios distribuidos aleatoriamente y de manera uniforme.

El modelo de predicción que emplearon para modelar las pérdidas del trayecto en ambas ciudades responde a la ecuación 5.7:

$$PL [dB] = \alpha + \beta \cdot 10 \log d + \sigma_{SF} \quad (5.7)$$

Donde:

α : pérdidas a una distancia de referencia (5 m)

β : pendiente de pérdidas

σ_{SF} : factor por ensombrecimiento

En el estudio se realizaron distintas medidas variando la ganancia y la altura de las antenas transmisora y receptora, pero aquí vamos a mostrar únicamente algún ejemplo que nos permita entender el proceso de análisis. En concreto las medidas realizadas en Nueva York resultaron:

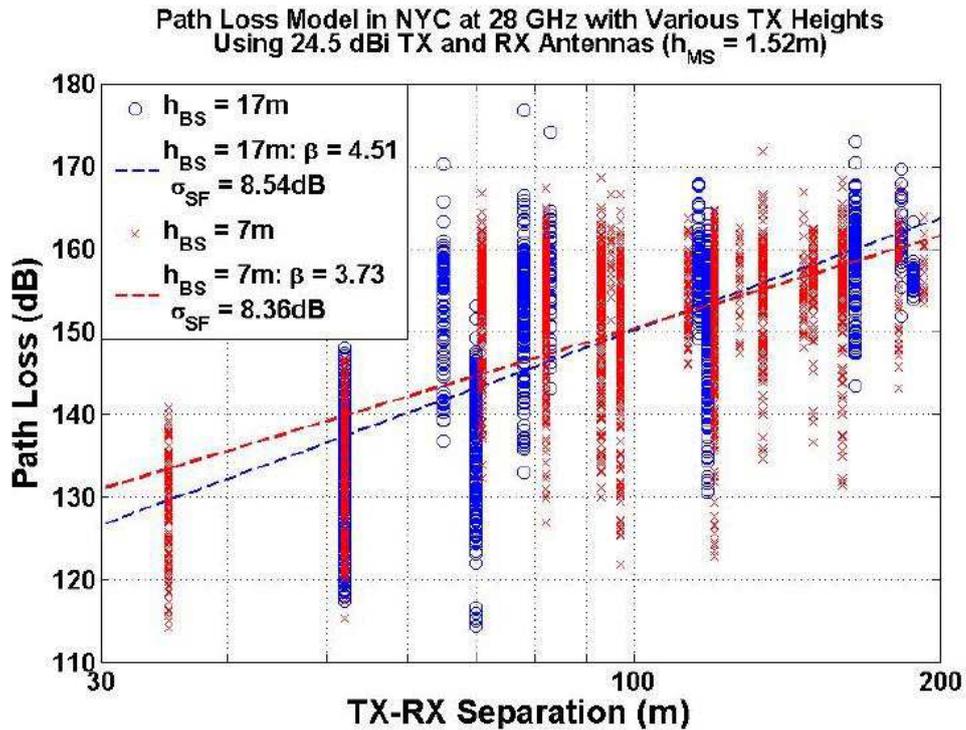


Figura 5.8. Modelo de propagación para Nueva York en 28 GHz [37]

Una vez obtenidas estas medidas, estamos en disposición de calcular los parámetros de la ecuación anterior para definir el modelo de propagación de este caso. Los resultados se presentan en la tabla 5.6:

Frecuencia [GHz]	Altura del TX [m]	Altura del RX [m]	Ganancia de las antenas (TX y RX) [dBi]	Condiciones	Parámetros		
					β	α [dB]	σ_{SF} [dB]
28	7	1.5	24.5	NLOS	3.73	75.85	8.36
	17				4.51	59.89	8.52

Tabla 5.6. Parámetros obtenidos [37]

El modelo de propagación resultante permite predecir la transmisión de las ondas milimétricas en entornos microcelulares urbanos de manera más precisa. También sugiere que en el futuro de las comunicaciones de ondas milimétricas será preciso contar con antenas de elevada ganancia y directividad, que permitan compensar la atenuación que sufren este tipo de ondas.

6. Conclusiones y trabajos futuros

En los primeros apartados hacíamos referencia a la importancia que tienen los modelos de propagación dentro de los sistemas de comunicaciones móviles. Cada vez que surge una nueva tecnología en este ámbito, se hace necesario modelar el canal de propagación así como estudiar nuevos modelos de propagación que permitan obtener resultados precisos en cualquier escenario. Aproximadamente desde el año 2010 se ha venido implantando en Europa el estándar LTE perteneciente a la cuarta generación de móviles y unos años por detrás su evolución LTE-Advanced. La llegada de estas dos nuevas tecnologías hizo necesaria la definición de nuevos modelos de canal, así como la creación de nuevos modelos de propagación o adaptación de los ya existentes. La implementación de redes 4G se lleva a cabo hoy en día en prácticamente todo el territorio, por lo que continuamente aparecen nuevos estudios y ejemplos reales que permiten estudiar el comportamiento de los modelos de canal y de predicción de pérdidas con el objetivo de una mejora continua de estas herramientas. Y como ha pasado con todas las generaciones anteriores, ya se encuentra en desarrollo la siguiente, la generación 5G, que se espera que esté operativa en el 2020. Por lo tanto, también se hace imprescindible la definición de un nuevo modelo de canal y modelos de propagación para esta futura tecnología.

A lo largo de este trabajo, lejos de definir nuevos modelos de canal o innovadores modelos de propagación (tareas muy complicadas fruto de investigaciones llevadas a cabo por expertos durante un largo periodo de tiempo), sí que hemos intentado hacer una recopilación de los modelos existentes empleados en redes 4G y comparar algunos de ellos para ver cómo se comportan en distintos escenarios. Tanto en la parte de LTE como en la de LTE-Advanced hemos visto que el modelo COST 231 Hata era el más indicado de los analizados para predecir las pérdidas del trayecto. En cuanto a la parte de 5G, como todavía se encuentra en fase de investigación, hemos extraído información sobre las futuras bandas que se están estudiando, así como las características que deberá cumplir el nuevo modelo de canal. También hemos presentado tres modelos de predicción que pueden ser utilizados haciendo uso de una parametrización correcta con un ejemplo que lo ilustra.

Hoy en día los modelos de propagación están implementados en potentes herramientas software que permiten planificar sistemas de comunicaciones móviles mediante el empleo de mapas del terreno. A consecuencia de esto, tanto el desarrollo de nuevos modelos como la mejora de los ya existentes se encuentran condicionados por limitaciones como el uso de memoria o el tiempo de cálculo necesario. En el caso de los estudios que se están realizando sobre modelos de propagación para 5G, la no excesiva complejidad de los nuevos sistemas es un requisito fundamental que ha de tenerse en cuenta. Por lo tanto, la línea de trabajo futura sobre este tema irá enfocada a conjugar de manera eficiente la inclusión de nuevas tecnologías cada vez más complejas en las comunicaciones móviles, junto con el desarrollo de modelos de propagación que puedan ser implementados en ordenadores sin sobrecargarlos.

7. Referencias (Norma ISO 690:2010(E))

- [1] Wikipedia, the free encyclopedia. *Radio propagation model* [en línea]. [Actualizado 21 mayo 2015] [fecha de consulta: 09 marzo 2016]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_propagation_model
- [2] Prof. Ing. José C. Benítez P. *Sesión: 6 Modelos de predicción de pérdidas de propagación* [en línea]. 6 de Julio de 2014. [Fecha de consulta: 10 de Marzo de 2016]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/c09271/uni-fiee-scm-sesion-06-modelos-de-prediccion-de-perdida-de-propagacin>
- [3] Herradón Díez, Rafael. *Comunicaciones móviles digitales*. 1ª ed. Madrid: E.U.I.T. de Telecomunicaciones, UPM, 2008
- [4] Wikipedia, the free encyclopedia. *Historia del teléfono móvil* [en línea]. [Actualizado 9 marzo 2016] [Fecha de consulta: 15 marzo 2016]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_tel%C3%A9fono_m%C3%B3vil
- [5] Varios autores. *Telecomunicaciones móviles*. 2ª ed. Barcelona: Marcombo S.A., 1998. ISBN 8426711499
- [6] Simon R. Saunders, Alejandro Aragón-Zavala. *Antennas and propagation for wireless communication systems*. 2ª ed. Nueva York: Wiley, 2000. ISBN 9780471986096
- [7] Awe Communications. *Prediction of Wavepropagation* [en línea]. [Fecha de consulta: 23 marzo 2016]. Disponible en: <http://www.awe-communications.com/Propagation/>
- [8] Figueiras A. R. *Una panorámica de las telecomunicaciones*. 1ª ed. Madrid: Pearson Educación S.A., 2002. ISBN 8420531006
- [9] Ing. Reinier Alonso Quintana, Ing. Raikel Bordón López, MSc. Samuel Montejo Sánchez. *Estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico* [en línea]. 1 abril 2013 [Fecha de consulta: 26 marzo 2016]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282013000100002
- [10] A. Obota, O. Simeonb, J. Afolayanc. *Comparative analysis of path loss prediction models for urban macrocellular environments*. Nigerian Journal of Technology, Octubre 2011, vol. 30, no. 3
- [11] Dieter J. Cichon. *Propagation Models for Small- and Micro-Cells*. En: Propagation Prediction Models [en línea]. pp. 149-166 [fecha de consulta: 24 abril 2016]. Disponible en: <http://www.winlab.rutgers.edu/~andrej/research/docs/cost231/ch4.pdf>
- [12] Varios autores. *Antenas*. 2ª ed. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya (UPC), 31 diciembre 2004. ISBN 9788483019900
- [13] Magdalena Nohrborg. *LTE* [en línea] [fecha de consulta: 3 junio 2016]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>

- [14] 3GPP TS 36.101, *E-UTRA: User Equipment (UE) radio transmission and reception* [en línea] [fecha de consulta: 4 junio 2016]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/DynaReport/36101.htm>
- [15] Nakamura, Takaharu. *LTE-Advanced (3GPP Release 10 and beyond) RF aspects* [en línea] [fecha de consulta: 4 junio 2016]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10>
- [16] Ministerio de Industria, Energía y Turismo. *Estudio sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos* [en línea] [fecha de consulta: 5 junio 2016]. Disponible en: <http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/banda-ancha/cobertura/Paginas/otros-documentos-interes.aspx>
- [17] R4-070872 3GPP TR 36.803v0.3.0, *User Equipment (UE) radio transmission and reception*, mayo 2007
- [18] 3GPP TR 36.873 V12.2.0, *Study on 3D channel model for LTE*, junio 2015
- [19] ITU-R M.2135-1, *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-Advanced*, diciembre 2009.
- [20] Noman Shabbir, Muhammad t. Sadiq, Hasnain Kashif, Rizwan Ullah. *Comparision of radio propogation models for Long term Evolution (LTE) Network*. International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN). Septiembre 2011, vol. 3, no 3
- [21] Jeanette Wannstrom. *LTE-Advanced* [en línea] junio 2013 [fecha de consulta: 8 junio 2016]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>
- [22] Matthew Baker. *LTE-Advanced Physical Layer* [en línea] [fecha de consulta: 10 junio 2016]. Disponible en: ftp://www.3gpp.org/workshop/2009-12-17_ITU-R_IMT-Adv_eval/docs/pdf/REV-090003-r1.pdf
- [23] International Telecommunication Union. *Final Acts WRC-07* [en línea] Ginebra, 2007 [fecha de consulta: 11 junio 2016]. Disponible en: http://www.itu.int/dms_pub/itu-s/oth/02/01/S020100002C4006PDFE.PDF
- [24] Yassir A. Ahmad, Walid A. Hassan, Tharek Abdul Rahman. *Studying Different Propagation Models for LTE-A System*. International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE 2012). 3-5 julio 2012, Kuala Lumpur, Malasia
- [25] ITU-R P.1546-4. *Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3000 MHz*, septiembre 2013
- [26] Maisons-Alfort. *Comments on the JTG5-6 propagation model*. Electronic Communications Committee, 8 abril 2009

- [27] Javier Enrique Arévalo Peña. *Correlation Analysis of Propagation Models for the Design of a LTE-A Network*. 2016 IEEE International Engineering Summit, II Cumbre Internacional de las Ingenierías (IE-Summit). 2-5 marzo 2016, Boca del Río, México.
- [28] Next Generation Mobile Networks Alliance. *NGMN 5G WHITE PAPER* [en línea] 17 febrero 2015 [fecha de consulta: 13 junio 2016]. Disponible en: <https://www.ngmn.org/5g-white-paper/5g-white-paper.html>
- [29] Ian D. Brown. *Radio Mobile Handbook* [en línea]. [Fecha de consulta: 25 marzo 2016]. Disponible en: <http://www.antennex.com/Sshack/radmob/radmob-es.htm>
- [30] Xirio online [en línea]. [Fecha de consulta: 25 marzo 2016]. Disponible en: <http://www.xirio-online.com>
- [31] Atoll Radio Planning Software [en línea]. [Fecha de consulta: 25 marzo 2016]. Disponible en: <http://www.forsk.com/atoll/>
- [32] Mentum Planet: RF Network Planning & Optimization [en línea]. [Fecha de consulta: 25 Marzo 2016]. Disponible en: <http://www.infovista.com/products/Mentum-Planet-Live-RF-planning-and-optimization>
- [33] Quotient Associates. *5G Candidate Band Study* [en línea]. Final Report to Ofcom, marzo 2015. [Fecha de consulta: 15 junio 2016]. Disponible en: <http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/above-6ghz/qa-report.pdf>
- [34] 5G Channel Model for bands up to 100 GHz [en línea]. Versión revisada en mayo 2016. [Fecha de consulta: 16 junio 2016]. Disponible en: [http://www.5gworkshops.com/5G_Channel_Model_for_bands_up_to100_GHz\(2016-05-13\).pdf](http://www.5gworkshops.com/5G_Channel_Model_for_bands_up_to100_GHz(2016-05-13).pdf)
- [35] Varios autores. *Channel Modelling for the Fifth Generation Mobile Communications*. The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)
- [36] METIS. *METIS final project report* [en línea]. 30 abril 2015. [Fecha de consulta: 15 mayo 2016]. Disponible en: https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D8.4_v1.pdf
- [37] Radio Propagation Path Loss Models for 5G Cellular Networks in the 28 GHz and 38 GHz Millimeter-Wave Bands. *IEEE Communications Magazine*, Septiembre 2014, vol. 30, issue 9.
- [38] George R. MacCartney Jr., Junhong Zhang, Shuai Nie, Theodore S. Rappaport. *Path Loss Models for 5G Millimeter Wave Propagation Channels in Urban Microcells*. *IEEE Global Communications Conference, Exhibition & Industry Forum*, 9-13 diciembre 2013, Atlanta, EEUU
- [39] 3D Channel Model in 3GPP. *IEEE Communications Magazine*, febrero 2015, vol. 53, issue 3
- [40] 3GPP TR 25.996 V11.0.0, *Spatial channel model for MIMO simulations*, septiembre 2012

- [41] ITU-R M.2135-1, *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-Advanced*, diciembre 2009
- [42] WINNER II Channel Models, Deliverable D1.1.2 V1.2, IST-4-027756 WINNER II Deliverable, 4 febrero 2008.
- [43] J. B. Andersen. *Propagation measurements and models for wireless communications channels*. IEEE Communications Magazine, enero 1995, vol. 33, issue 1
- [44] K. Haneda, G. R. MacCartney. *Indoor 5G 3GPP-like Channel Models for Office and Shopping Mall Environments*. IEEE International Conference on Communications Workshops (ICCW), mayo 2016
- [45] George R. MacCartney. *Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks*. IEEE Access, diciembre 2015, vol. 3, p. 2388 – 2424.