



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DISEÑO DE UN PLAN NOMINAL PARA UN SISTEMA LTE MEDIANTE UNA HERRAMIENTA DE PLANIFICACIÓN RADIO COMERCIAL

Proyecto final de carrera

presentado ante la

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación
de Barcelona de la Universidad Politécnica de Catalunya**

para la obtención del grado de

INGENIERO SUPERIOR DE TELECOMUNICACIÓN

Realizado por:

Javier García Falaguera

Tutor:

Anna Umbert Juliana

Junio 2014

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a Anna Umbert Juliana la atención dedicada, siempre ha estado cuando la he necesitado y ha sido un gran apoyo.

En segundo lugar, a mis hermanos, mis padres, mi familia y mis amigos, que son mi pilar fundamental y mi fuerza.

Y en tercer y último lugar, reservando un lugar especial, a mi madre, que siendo como es, ha sido ella la que ha dedicado a este proyecto más tiempo de todos los conocidos. Espero que esta obra mía te guste, porque te la dedico especialmente.

Resumen del Proyecto

Una de las tecnologías que han experimentado más avances en este último siglo ha sido la de los sistemas de telefonía móvil. Es una tecnología en constante crecimiento debido a que se ha convertido en un instrumento indispensable en la vida cotidiana de los ciudadanos. Y es ese uso continuo y cotidiano lo que ha llevado a un progresivo desarrollo de dicha tecnología hasta hacer posible la idea de que sea difícil imaginar un mundo sin estos sistemas de telecomunicaciones. Estos años de investigación han conseguido que los sistemas de telefonía móvil hayan pasado de ser un simple servicio de intercambio de voz a ser un sistema que ofrece una amplia gama de aplicaciones que permiten las comunicaciones multimedia en tiempo real, siendo así posible el movimiento del usuario y con una gran capacidad en la velocidad de transmisión.

El sistema LTE (*Long Term Evolution*) es el nombre que el 3GPP ha dado a la siguiente etapa en la evolución de las comunicaciones móviles. Anteriormente, el 3GPP ha especificado los siguientes sistemas precedentes al LTE: GSM, GPRS, EDGE, UMTS y HSPA. Tiene como objetivo culminar el sistema de cuarta generación de comunicaciones móviles mediante el LTE-Advanced. En líneas generales, el LTE tiene como objetivo adaptar los sistemas de comunicaciones móviles para el uso de internet, consiguiendo así 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente en el interfaz radio. Además, el LTE opera en modo paquete ofreciendo todos los servicios por protocolo IP, reduciendo tiempos de latencia y permitiendo canalizaciones graduales de hasta 20 MHz.

La implantación de una red de comunicaciones móviles en una cierta zona no es una tarea trivial. Existen una gran cantidad de variables, tales como las interferencias, movilidad de los usuarios, servicios demandados, carga de tráfico en la célula, que van a reducir la capacidad nominal correspondiente a un usuario en concreto. Por esta razón, antes de iniciar la implementación de una red en un determinado entorno se realiza un plan nominal que simula la red en un entorno software. Es en ese entorno en el que se propone este proyecto final de carrera.

Resum del Projecte

Una de les tecnologies que han experimentat més avenços en aquest últim segle ha estat la dels sistemes de telefonia mòbil. És una tecnologia en constant creixement ja que s'ha convertit en un instrument indispensable en la vida quotidiana dels ciutadans. I és aquest ús continu i quotidià el que ha portat a un progressiu desenvolupament d'aquesta tecnologia fins a fer possible la idea que sigui difícil imaginar un món sense aquests sistemes de telecomunicacions. Aquests anys d'investigació han aconseguit que els sistemes de telefonia mòbil hagin passat de ser un simple servei d'intercanvi de veu a ser un sistema que ofereix una àmplia gamma d'aplicacions que permeten les comunicacions multimèdia en temps real, sent així possible el moviment de l'usuari i amb una gran capacitat en la velocitat de transmissió.

El sistema LTE (*Long Term Evolution*) és el nom que el 3GPP ha donat a la següent etapa en l'evolució de les comunicacions mòbils. Anteriorment, el 3GPP ha especificat els sistemes precedents al LTE: GSM, GPRS, EDGE, UMTS i HSPA. Té com a objectiu culminar el sistema de quarta generació de comunicacions mòbils mitjançant el LTE-Advanced. En línies generals, el LTE té com a objectiu adaptar els sistemes de comunicacions mòbils per a l'ús d'internet, aconseguint així 100 Mbps a l'enllaç descendent i 50 Mbps a l'enllaç ascendent en la interfície ràdio. A més, el LTE opera en mode paquet oferint tots els serveis per protocol IP, reduint temps de latència i permetent canalitzacions graduals de fins a 20 MHz.

La implantació d'una xarxa de comunicacions mòbils en una certa zona no és una tasca trivial. Existeixen una gran quantitat de variables, com ara les interferències, la mobilitat dels usuaris, serveis demandats, càrrega de trànsit a la cèl·lula, que reduiran la capacitat nominal corresponent a un usuari en concret. Per aquesta raó, abans d'iniciar la implementació d'una xarxa en un determinat entorn es realitza un pla nominal que simula la xarxa en un entorn programari. És en aquest entorn en el qual es proposa aquest projecte final de carrera.

Abstract

One of the technologies that have experienced more progress in the last century has been to the mobile phone systems. It is a constantly growing technology because it has become an indispensable tool in the daily life of citizens. And is that continuous and daily use which has led to a progressive development of this technology to make possible the idea that it is hard to imagine a world without these telecommunications systems. In these years of research mobile systems have evolved from a simple provider of voice service to a system that offers a wide range of applications for multimedia communications in real time, making it possible mobile users with a high-capacity transmission speed.

The LTE (*Long Term Evolution*) system is the name that the 3GPP has given to the next stage in the evolution of mobile communications. Previously, the 3GPP has specified the following prior to LTE systems: GSM, GPRS, EDGE, UMTS and HSPA. IT aims to complete the system of fourth generation mobile communication via LTE-Advanced. In general, the LTE aims to adapt mobile communications systems for Internet use, achieving 100 Mbps downlink and 50 Mbps on the uplink in the radio interface. In addition, the LTE operates in packet mode offering all services with IP protocol, reducing latency and enabling gradual channel bandwidths up to 20 MHz.

The implementation of a mobile communication network in a certain area is not a trivial task. There are a lot of variables, such as interference, mobility of users, services required, traffic load in the cell, which will reduce the nominal capacity corresponding to a particular user. Therefore, before starting the implementation of a network in a given environment a nominal network plan on a software environment is performed. It is in this framework that this final project is proposed.

Índice General

Agradecimientos.....	3
Resumen del Proyecto	5
Resum del Projecte	7
Abstract	9
Índice General.....	11
Índice de Figuras.....	13
Índice de Tablas	15
Introducción.....	17
1. Planteamiento del Problema	19
1.1. Propuesta	19
1.2. Justificación.....	19
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo General	19
1.3.2. Objetivos Específicos	20
1.4. Limitaciones.....	20
2. Estado del Arte.....	21
2.1. Evolución comunicaciones móviles	21
2.2.1. Sistemas Móviles Precelulares	21
2.1.2. Sistemas móviles celulares	22
2.1.2.1. Sistemas Móviles de Primera Generación (1G)	23
2.1.2.2. Sistemas móviles de segunda generación (2G).....	24
2.1.2.2.1. Sistemas móviles de 2,5G	25
2.1.2.3. Sistemas móviles de tercera generación (3G)	27
2.1.2.4. Sistemas de cuarta generación (4G)	29
2.2. Sistema LTE.....	30
2.2.1. Arquitectura del sistema LTE	31
2.2.1.1. Red de Acceso E-UTRAN.....	31
2.2.1.2. Red troncal EPC	32
2.2.2. Tecnologías de Acceso Múltiple.....	33
2.2.2.1. OFDMA.....	33
2.2.2.2. SC-FDMA.....	35
2.2.3. Conceptos de Interfaz Radio.....	36
2.2.3.1. Capa Física.....	36
2.2.3.2. Bloque Recursos Físicos (<i>Physical Resource Block</i>).....	37
2.2.3.3. Canales Físicos	38
3. Metodología	41
3.1. Investigación Teórica	41
3.2. Aprendizaje de la herramienta ATOLL	41
3.3. Despliegue y optimización de una red LTE en ATOLL.....	42
3.4. Análisis de resultados obtenidos y líneas futuras.....	42
4. Desarrollo.....	43
4.1. Aprendizaje de la herramienta ATOLL	43
4.1.1. Diseño de una red LTE en ATOLL	43
4.1.2. Predicciones de cobertura	45
4.1.3. Simulaciones de Monte Carlo	46
4.1.4. Cálculo de <i>Throughputs</i>	49
4.1.5. Técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output)	50
4.2. Planificación de una red LTE en ATOLL	51

4.2.1.	Despliegue de la red	51
4.2.2.	Configuración del modelo de propagación.....	55
4.2.3.	Configuración de servicios, terminales, movilidades y perfiles de usuario	55
4.2.4.	Estudios de cobertura por nivel de señal	57
4.3.	Optimización de la red LTE	58
4.3.1.	Creación de mapa de tráfico	58
4.3.2.	Asignación de vecinos.....	60
4.3.3.	Planificación de frecuencias.....	61
4.3.4.	Planificación del <i>Physical Cell ID</i>	61
5.	Análisis.....	62
5.1.	Planificación de la red	62
5.1.1.	Definición estándar LTE	62
5.1.1.1.	Importación de la zona de trabajo.....	64
5.1.1.2.	Definición de la <i>Computation/Focus Zone</i>	65
5.1.2.	Configuración del modelo de propagación	67
5.1.3.	Configuración de servicios, movilidad, terminales y perfiles de usuario	68
5.2.	Análisis de Cobertura sin mapa de tráfico.....	68
5.2.1.	Cobertura por transmisor	68
5.2.2.	Cobertura por zonas de solapamiento	69
5.2.3.	Cobertura por nivel de señal	70
5.2.4.	Optimización sin mapa de tráfico	71
5.3.	Análisis de Cobertura considerando el mapa de tráfico	73
5.3.1.	Definición mapa de tráfico.....	73
5.3.2.	Simulaciones.....	74
5.3.3.	Cobertura $C/(I+N)$ inicial	78
5.3.4.	Optimización de la red considerando al mapa de tráfico.....	79
5.3.4.1.	Cobertura por nivel de señal de la red optimizada.....	80
5.3.4.2.	Cobertura por $C/(I+N)$ de la red optimizada	81
5.3.4.3.	Cobertura por <i>Throughput</i> de la red optimizada	85
5.4.	Análisis de la cobertura aplicando técnicas MIMO.....	89
5.4.1.	Efecto de técnicas MIMO a nivel celular	89
5.4.1.1.	Estudio de cobertura por <i>Throughput</i> aplicando técnicas MIMO a nivel de celda	89
5.4.1.2.	Comparativa de <i>Throughput</i> con las diferentes técnicas de MIMO a nivel de celda	92
5.4.1.3.	Estudio de cobertura por <i>Throughput</i> aplicando técnicas MIMO a nivel de usuario	94
5.4.1.4.	Comparativa de $C/(I+N)$ con las diferentes técnicas de MIMO	96
5.4.2.	Efecto de técnicas MIMO para los diferentes servicios	97
6.	Conclusiones y Líneas Futuras	103
7.	Referencias.....	106
Anexo 1.	Bandas LTE	107

Índice de Figuras

Figura 1. Generaciones de los sistemas de comunicaciones móviles.	22
Figura 2. Arquitectura de la red GSM.....	25
Figura 3. Arquitectura de la red GSM/GPRS.	27
Figura 4. Arquitectura de la red GSM/GPRS +UMTS de la R99.	28
Figura 5. Características principales de las diferentes <i>Releases</i> de UMTS.....	29
Figura 6. Estándares de las diferentes tecnologías de comunicaciones móviles.....	30
Figura 7. Arquitectura de la red LTE.....	31
Figura 8. Espectro de la señal OFDMA.	34
Figura 9. Esquema de transmisión SC-FDMA.	35
Figura 10. Multiplexación de los usuarios mediante SC-FDMA.	36
Figura 11. PRB de 7 símbolos con 12 subportadoras.	37
Figura 12. Pasos que se tienen que seguir para una correcta planificación de una red para el sistema LTE.....	44
Figura 13. Ejemplo de simulación en el mapa de ATOLL.....	47
Figura 14. Algoritmo de las simulaciones LTE en ATOLL.	49
Figura 15. Definición del <i>Clutter Classes</i>	54
Figura 16. <i>Computation Zone</i> de la red LTE.	55
Figura 17. Resultado de la predicción <i>Coverage by Signal Level</i>	58
Figura 18. Mapa de tráfico para la ciudad de Barcelona según los <i>Enviroments</i>	59
Figura 19. <i>Bearers Selection Thresholds</i> para todas las movilidades de la red LTE.	60
Figura 20. Clasificación de los diferentes <i>clutter</i> del mapa de trabajo.	65
Figura 21. <i>Computation Zone</i> de la red LTE.	66
Figura 22. <i>Focus Zone</i> de la red LTE.	67
Figura 23. Configuración del modelo de propagación <i>SPM</i>	67
Figura 24. Resultado de la predicción <i>Coverage by Transmitter</i>	69
Figura 25. Resultado de la predicción <i>Coverage by Overlapping Zones</i>	70
Figura 26. Resultado de la predicción <i>Coverage by Signal Level</i>	71
Figura 27. Desplazamientos de los Sites.	72
Figura 28. Resultado de la predicción <i>Coverage by Signal Level</i> con la red optimizada.....	73
Figura 29. Resultado de la predicción <i>Coverage by C/(I+N)</i> con SF3.	79
Figura 30. Resultado de la predicción <i>Coverage by Signal Level</i> con la red optimizada.....	80
Figura 31. Comparativa de % <i>Covered Area</i> entre caso inicial y optimizado.	81
Figura 32. Resultado de las predicciones <i>Coverage by C/(I+N) for DL</i> para las diferentes condiciones de tráfico.	82
Figura 33. Resultado de las predicciones <i>Coverage by C/(I+N) for UL</i> para las diferentes condiciones de tráfico.	83
Figura 34. Comparación del nivel en dB's del canal PDSCH tanto en <i>downlink</i> y del PUSCH en <i>uplink</i>	84
Figura 35. Comparación del nivel de PDSCH en la zona de interés.....	85
Figura 36. Resultado de las predicciones <i>Coverage by Throughput for DL</i> para las diferentes condiciones de tráfico.	86
Figura 37. . Resultado de las predicciones <i>Coverage by Throughput for UL</i> para las diferentes condiciones de tráfico.	87

Figura 38. Comparación del <i>Effective RLC Channel Throughput</i> para diferentes <i>scaling factors</i>	88
Figura 39. Comparativa del <i>Effective RLC Channel Throughput</i> para la técnica de diversidad... 90	
Figura 40. Comparativa del <i>Effective RLC Channel Throughput</i> para la técnica de SU.	91
Figura 41. Comparativa del <i>Effective RLC Channel Throughput</i> para la técnica de AMS.	92
Figura 42. Comparativa del <i>Effective RLC Channel Throughput</i> para las diferentes técnicas MIMO con un mismo <i>scaling factor</i> =3.	93
Figura 43. Comparativa del <i>Effective RLC User Throughput</i> para la técnica de diversidad.	94
Figura 44. Comparativa del <i>Effective RLC User Throughput</i> para la técnica de SU.	95
Figura 45. Comparativa del <i>Effective RLC User Throughput</i> para la técnica de AMS.	96
Figura 46. Comparativa de los diferentes niveles de $C/(I+N)$ para las diferentes técnicas MIMO.	97
Figura 47. Descripción de la calidad de los servicios de VoIP y Web Browsing para el DL y UL.	100
Figura 48. Descripción de la calidad de los servicios de FTP Download y Video Conferencing para el DL y UL.	101
Figura 49. Listado de Bandas de LTE.	107

Índice de Tablas

Tabla 1. Canalización en el sistema LTE.	37
Tabla 2. Número de PRB en función de la canalización.	37
Tabla 3. Velocidades de pico en función de la canalización.....	38
Tabla 4. Canales físicos de un sistema LTE.....	39
Tabla 5. Predicciones de cobertura disponibles en ATOLL.	46
Tabla 6. Parámetros de la Plantilla LTE.	53
Tabla 7. Parámetros del modelo de propagación <i>Cost-Hata</i>	55
Tabla 8. Parámetros de los servicios de la red LTE.	56
Tabla 9. Características de los terminales de la red LTE.	57
Tabla 10. Tipos de movilidad de usuarios de la red LTE.....	57
Tabla 11. Características de los perfiles de usuario en la red LTE.....	57
Tabla 12. Parámetros de los entornos de la red LTE.....	59
Tabla 13. Características de los <i>Radio Bearers</i> en la red LTE.	60
Tabla 14. Plantilla del sistema LTE.	64
Tabla 15. Parámetros de los entornos de la red LTE.....	74
Tabla 16. Estadísticas de las simulaciones realizadas con diferentes <i>scaling factors</i>	74
Tabla 17. Descripción por servicio de las diferentes simulaciones realizadas.	77
Tabla 18. Resumen de parámetros de los servicios de la red LTE.	98
Tabla 19. Descripción de los diferentes servicios para las diferentes tecnologías de MIMO con una simulación de <i>scaling factor = 3</i>	98

Introducción

La evolución de los sistemas de telefonía móvil ha sido un proceso que ha visto en pocos años la introducción de múltiples avances tecnológicos que han permitido que sean cada vez más las personas que hacen uso del teléfono celular como dispositivo indispensable en sus vidas cotidianas. Así pues, imaginar hoy en día un mundo sin las telecomunicaciones sería pensar en otro planeta completamente diferente al que vivimos actualmente. Nuevas técnicas de codificación, multiplexación, cifrado, acceso, etc., han permitido que la telefonía móvil haya pasado de ser un servicio de voz, como lo era en un principio, a uno que ofrece una amplia gama de aplicaciones multimedia que permiten las comunicaciones en tiempo real, a altas velocidades de transmisión e incluso con altas posibilidades de movimiento.

Long Term Evolution (LTE) es el nombre que la 3GPP ha dado a la línea evolutiva que abarca los sistemas de comunicaciones móviles GSM, GPRS, EDGE, UMTS y HSPA, y que con la idea de culminar en LTE-Advanced, se caracteriza por ser un sistema de cuarta generación. Con ello se plantea en un comienzo, entre varios objetivos, alcanzar velocidades pico en la interfaz radio por encima de los 100 Mbps en el enlace descendente y de los 50 Mbps en el ascendente. Además, debe operar completamente en modo paquete ofreciendo todos los servicios sobre el protocolo IP, reducir los tiempos de latencia y permitir canalizaciones flexibles de hasta 20 MHz.

Son grandes la cantidad de variables presentes a la hora de llevar a cabo el diseño y planificación de una red comunicaciones móviles. Elementos tales como las interferencias, movi­lidades de los usuarios, servicios demandados, condiciones de propagación, entre otras hace que sea indispensable el diseño de una red que permita compartir de forma organizada los recursos radio entre los usuarios garantizando una buena calidad de servicio.

El presente Proyecto Final de Carrera propone la planificación de un plan nominal y su posterior optimización de una red LTE utilizando la herramienta de planificación radio ATOLL. El propósito que persigue este proyecto es el de realizar una planificación de red para la nueva generación de comunicaciones como si de una entidad operadora se tratase. El objetivo será comprobar ciertos indicadores de la red para ver si efectivamente se cumple con los requisitos de diseño de una red que garantice una buena calidad en el servicio y una alta capacidad a nivel de cobertura.

El informe se estructura como se describe a continuación. En el capítulo 1 se expone el contexto en el cual surge el proyecto así como los objetivos planteados, las limitaciones y alcances del mismo. En el capítulo 2 se explican los conceptos teóricos necesarios para la comprensión del proyecto introduciendo al lector con una breve descripción de las generaciones de comunicaciones móviles para después entrar en detalle de los diferentes aspectos más relevantes que caracterizan a la tecnología LTE. En el capítulo 3 se describe la metodología empleada para la realización de cada fase del proyecto, desde la investigación teórica hasta la obtención de los resultados. En el capítulo 4 se explica en detalle los algoritmos y ecuaciones empleadas en ATOLL que son de interés en este trabajo, así como de las diferentes funcionalidades y métodos que posee la herramienta ATOLL para medir las diferentes características de una red. El capítulo 5 contiene la descripción, resultados y análisis de todas las simulaciones realizadas en la red LTE sobre la herramienta ATOLL. Por último, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones y las líneas futuras de investigación a partir del trabajo desarrollado.

1. Planteamiento del Problema

1.1. Propuesta

En este proyecto final de carrera se propone la realización de un plan nominal para un sistema LTE con la herramienta de planificación radio ATOLL para posteriormente estudiar diversos parámetros relacionados con estas redes y compararlos con los esperados según la teoría.

En concreto, el proyecto se centra en el diseño de un plan nominal para un entorno urbano. El plan nominal de red se elabora para simular el comportamiento de la futura red en términos de capacidad y cobertura, analizando los resultados después de realizar estudios como: área de cobertura, capacidad del sistema, DL/UL *Throughput*, etc.

1.2. Justificación

La iniciativa de este proyecto surge dentro del Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles (GRCM) perteneciente al Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Catalunya con el fin de profundizar en el conocimiento del módulo LTE desarrollado por la empresa FORSK para la herramienta *software* ATOLL.

Previamente el grupo de investigación ha desarrollado proyectos basados en las tecnologías de comunicaciones móviles 2G y 3G con la misma herramienta y se ha podido comprobar que los resultados obtenidos modelan de forma realista las redes en cuestión. Ahora, con la aparición de las tecnologías 4G de comunicaciones móviles y la disponibilidad del nuevo módulo de ATOLL, surge la necesidad de evaluar resultados prácticos de diversos aspectos y establecer comparaciones con la teoría y las especificaciones del 3GPP establecidas para esta tecnología, con el fin de mantenerse siempre a la vanguardia de las nuevas tecnologías y evaluar en este caso el *software* ATOLL en el modelado de las redes LTE.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

La realización de un plan nominal para un sistema LTE en la ciudad de Barcelona mediante el *software* ATOLL, es decir, planificar y optimizar una red LTE en un entorno urbano y observar su impacto en dicha red.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar las características del sistema de telefonía móvil LTE.
- Estudiar los aspectos necesarios que intervienen en el proceso de planificación y optimización de una red LTE en la herramienta ATOLL.
- Aprendizaje del *software* ATOLL y dominar cada uno de los parámetros que intervienen en el modelado de la red.
- Diseñar y optimizar una red LTE para la ciudad de Barcelona donde posteriormente se evaluarán los diferentes parámetros introducidos para evaluar la calidad de dicha red.
- Observar, bajo diferentes condiciones de tráfico, la demanda y servicio de tráfico que ofrece la red.
- Comparar, bajo diferentes condiciones de tráfico, el *Signal Level*, el nivel de $C/(I+N)$ y *Throughput* tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente.

1.4. Limitaciones

- Para desarrollar el proyecto fue necesaria la versión 3.1.2 de ATOLL con el módulo AFP (*Automatic Frequency Planning*) instalado que permitiera realizar las asignaciones frecuenciales y de *Physical Cell IDs* de manera automática, precisa y rápida gracias a los algoritmos empleados con ATOLL.
- Los estudios realizados se limitaron a las opciones que ATOLL dispone para modelar redes LTE. En algunos casos los algoritmos empleados por ATOLL no corresponden a los empleados en la realidad porque se ven limitados por aspectos que no pueden implementarse en el programa. Por ejemplo, las simulaciones reflejan el estado del sistema en un tiempo instantáneo y no tienen memoria del pasado.

2. Estado del Arte

Este capítulo tiene como objetivo describir la evolución de las comunicaciones móviles, partiendo de los sistemas de móviles pre-celulares hasta llegar a la cuarta generación de la telefonía móvil. Posteriormente se lleva a cabo la descripción de la arquitectura de los sistemas LTE, así como sus características más relevantes.

2.1. Evolución comunicaciones móviles

En la actualidad la tecnología que está más desarrollada y sufre una mayor demanda, por encima incluso de internet es la tecnología móvil. Se estima que el 87% de la población mundial es usuaria de telefonía móvil [1]. Es esta capacidad que tiene la tecnología móvil de llegar a tantas personas lo que ha hecho que su avance tecnológico en el tiempo sea tan rápido. Este avance ha permitido el desarrollo de dispositivos móviles cada vez más sofisticados, capaces de ofrecer una amplia gama de aplicaciones, convirtiendo así el teléfono móvil en una herramienta indispensable de uso cotidiano en la sociedad actual.

2.2.1. Sistemas Móviles Precelulares

Un hecho evidente y que ha sido una constante a lo largo de la historia es que el desarrollo tecnológico siempre ha venido ligado al transcurso de alguna crisis. En este caso, el desarrollo de la tecnología móvil nació en el transcurso de la Segunda Guerra Mundial. Una vez finalizada la guerra, se aprovecharon todos los dispositivos útiles para fines comerciales. Dispositivos tales como la radio, el radar, el walkie-talkie y otras tecnologías inalámbricas fueron todo un éxito.

El 28 de julio de 1945, el comisario de la FCC (Federal Communications Commission) J.K. Jett publicó en el *Saturday Evening Post* un artículo titulado "*Phone me by air*" en el que se hacía referencia, por primera vez en la historia, a un sistema radio celular que permite el establecimiento de comunicaciones bidireccionales vía radio en la banda de 460 MHz. Si bien el artículo no explicaba el método en el que se podría lograr la comunicación entre el móvil y la red telefónica fija, sí hacía referencia al reuso frecuencial en áreas pequeñas, mencionando la posibilidad de que millones de usuarios en todo el país pudieran utilizar los mismos canales simultáneamente y sin interferirse. A pesar de que la FCC en su momento no concedió el espectro para llevar a cabo el servicio, se continuó el estudio de los sistemas celulares llegando a ser implementados posteriormente, con el mecanismo de reuso frecuencial como elemento fundamental [2].

Otra fecha significativa es el 17 de junio de 1946. En St. Louis, Missouri, USA, la FCC mencionada anteriormente permite que AT&T instale el primer sistema de telefonía móvil [3]. En este caso fue la instalación de un dispositivo móvil en un coche. Era un sistema denominado MTS (*Mobile Telephone Service*) que utilizaba seis canales en la banda de 150 MHz que posteriormente fueron reducidos a tres por problemas de interferencias de canales. Esto significaba que sólo se podían realizar tres llamadas simultáneas, originado lógicamente largas lista de espera.

Fue a partir de entonces, durante la década de los 50 y de los 60 en el que se fueron sumando nuevos sistemas de telefonía móvil tanto en Estados Unidos como en Europa, creándole competencia a la AT&T. Uno de los primeros sistemas europeos fue el MTA (*Mobiltelefonisystem A*) sueco, el sistema alemán A-Netz o el sistema OLT operado en Noruega. A medida que pasaban los años, nuevas mejoras eran introducidas, con lo que se requería una actualización de los sistemas. A mediados de los años 60, nuevas versiones comenzaban a emerger, tales como el IMTS (*Improved Mobile telephone Service*) o del MTB. Estos nuevos sistemas introducían cambios por ejemplo del reemplazo del botón de llamada, que en un principio era necesario mantenerlo presionado para poder hablar. Otros cambios fueron la sustitución de operaciones de conmutación manual por el marcado automático y la posibilidad de establecer una comunicación móvil a móvil, entre otras. Pero a pesar de la implantación de estos novedosos sistemas todavía se tenía la capacidad de estos sistemas móviles como un factor muy limitante [2].

De forma general, se puede decir que los sistemas de móviles pre-celulares se caracterizaban por tener pocas estaciones base con las que se pretendía cubrir áreas de terreno muy extensas transmitiendo a elevada potencia. Esto derivaba directamente en una capacidad muy limitada por parte de los usuarios, elevados costes de mantenimiento y un gran consumo de potencia en equipos terminales muy pesados y voluminosos que se situaban corrientemente en los vehículos. En este punto no tiene mucho sentido definir estos sistemas como “móviles” ya que está definiendo un sistemas en sí, que pueden ser móviles en el sentido que permiten el movimiento, pero en el que se tiene que estar presente para ser localizado, lo que no permitiría una libertad de movimiento grande, tal y como ocurre en nuestros días.

2.1.2. Sistemas móviles celulares

En este apartado se va a ver la evolución de los diferentes sistemas de comunicaciones móviles. Esta tecnología ha ido evolucionando en generaciones, cada una intentando sacar provecho de la anterior, corrigiendo sus limitaciones o aprovechando sus capacidades potenciales.

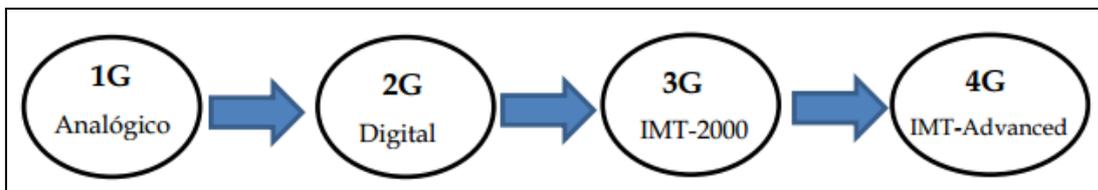


Figura 1. Generaciones de los sistemas de comunicaciones móviles.

Es importante resaltar una diferencia de lo que se ha comentado anteriormente. Los primeros sistemas móviles que surgieron tanto en Europa como en Estados Unidos no eran sistemas celulares. El concepto de sistemas móviles celulares surge en Bell Labs. En 1947 gracias al binomio formado por W.R. Young y D.H. Ring., que se pusieron las bases de lo que

hoy conocemos como comunicaciones móviles celulares. Young y Ring fueron los que diseñaron la división de un territorio extenso en pequeñas áreas de geometría hexagonal, a las que le pusieron el nombre de celdas. Como eran áreas de terreno poco extensas, para cubrir las se necesitaba un transmisor de poca potencia. También introdujeron el concepto de reuso frecuencial entre distintas celdas alejadas lo suficiente entre sí para no producirse interferencia y el concepto de *Handover*, que permitiría la continuidad de las comunicaciones entre los usuarios que viajaran entre celdas vecinas. Era tal la novedad que suponía la implantación de este sistema que hicieron falta 30 años para implementar este sistema celular y que se pudiera contar con el espectro necesario para llevarlo a cabo [3].

2.1.2.1. Sistemas Móviles de Primera Generación (1G)

Estos sistemas de primera generación fueron los pioneros en la aplicación del concepto de red celular. Se caracterizaban por ser analógicos y ofrecer únicamente servicios de voz. Esos sistemas no disponían todavía de mecanismos de control de potencia, por lo que siempre transmitían la misma potencia, sin tener en cuenta las condiciones del entorno o su ubicación. Por esta misma circunstancia el consumo de batería y las interferencias eran un factor muy limitante. Estos sistemas todavía se encontraban situados en los vehículos y no se había conseguido reducir su tamaño, con lo que seguían siendo muy voluminosos [4].

La empresa pionera en implantar un sistema celular de primera generación fue la NTT (*Nippon Telegraph and Telephone*) en 1979 en Japón. Posteriormente, nace en Noruega, en 1981, el primer sistema de primera generación multinacional, el NMT (*Nordic Mobile Telephony*). Este sistema se implantó en los países nórdicos (Dinamarca, Noruega, Suecia y Finlandia) usando la banda de 450 MHz.

Por otra parte, en Estados Unidos, después de sufrir una serie de retrasos en la regulación del sistema, se implantó en 1983, después de realizar una serie de pruebas en la ciudad de Chicago, el sistema AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*). Después de esto, fue implantado, en 1985, el sistema TACS (*Total Access Communications System*) en el Reino Unido, presentando muchas similitudes con el AMPS estadounidense. Otros sistemas similares que se implantaron en otros países fueron los sistemas C-Netz en Alemania Occidental, Radiocom 2000 en Francia o el RTMI/RTMS en Italia [2].

En Europa los sistemas de primera generación tuvieron un gran éxito y su expansión fue muy rápida. Rápidamente se adaptó el sistema a otros países en su misma versión o en versiones diferentes. Un ejemplo de esto es el sistema NMT, que fue adaptado para países de la Europa Oriental llamándolo NMT-900, ya que utilizaba la banda de 900 MHz en lugar de la de 450 MHz. Este sistema fue el primero en introducir el concepto de *roaming* internacional para utilizar el servicio en otros países donde operaba. Otros ejemplos son los sistemas TACS, que fue adoptado por algunos países de medio oriente y del sur de Europa y el sistema AMPS que fue adoptado por países de América del Sur y del lejano oriente, incluyendo a Australia y Nueva Zelanda.

Existían varios aspectos en común en los sistemas de primera generación mencionados hasta ahora. El primer aspecto interesante a destacar es que todos utilizaban la técnica de duplexado en frecuencia (FDD) definiendo diferentes bandas para el enlace ascendente y descendente. Se solían utilizar bandas centradas en torno a los 900 MHz. Otro aspecto significativo a destacar es el de la modulación. Todos los sistemas empleaban la modulación analógica FM para servicios de voz y la técnica de acceso FDMA que consiste en dividir el espectro disponible en canales que repartían entre las diferentes estaciones base, evitando así las interferencias asignando canales distintos a las estaciones base vecinas. Por último, es

importante destacar que por cada llamada se asignaba un canal dedicado para cada enlace durante todo el tiempo de la comunicación.

La limitación fundamental de estos sistemas es que ninguno de ellos era compatible entre sí, lo que llevaba a que si un usuario quería utilizar su teléfono móvil en esos años solamente le era posible utilizarlo en países en los que operaba ese sistema. Si viajaba a otros países en los que no operaba no le era posible el servicio.

2.1.2.2. Sistemas móviles de segunda generación (2G)

Debido a las predicciones de la demanda creciente de capacidad los sistemas de primera generación y del problema de la incompatibilidad de los sistemas coexistentes, se vislumbró la posibilidad de implantación de un único sistema global que permitiera la movilidad entre países, aprovechando también los grandes avances tecnológicos de los años 80, tales como la tecnología de los semiconductores y los circuitos integrados, dando lugar así a una nueva generación de comunicaciones móviles.

En este sentido la CEPT (*Conference of European Postal and Telecommunications*) creó en 1982 el grupo GSM, cuyas siglas en un comienzo significaban *Groupe Spéciale Mobile* y posteriormente fueron rebautizadas a *Global System for Mobile Communications*, con el fin de crear un sistema continental europeo nuevo y con una tecnología digital que pudiera ofrecer un servicio de buena calidad y con una alta eficiencia espectral. Este sistema debería cumplir con los requisitos de capacidad y de compatibilidad entre países. En 1989 la recién formada ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*) continuó con los avances del grupo GSM logrando el lanzamiento comercial del sistema en 1992.

La característica más relevante de los sistemas de primera generación a los sistemas de segunda generación es que pasaron a ser digitales. Este cambio de tecnología introdujo una serie de ventajas muy destacadas como una mayor calidad frente a interferencias o un uso más eficiente del espectro de comunicaciones. Además los avances de la tecnología proporcionarán una reducción de tamaño, así como la reducción del coste y la disminución en el consumo de potencia, permitiendo que las comunicaciones móviles pasaran de ser utilizadas por un grupo selectivo de personas, principalmente establecidas en vehículos, a extenderse a toda la población mundial interesada en comunicarse en cualquier momento y de cualquier lugar.

Por otro lado, las técnicas de procesamiento digital de la información como la modulación digital, codificación de canal, codificación de fuente, sistemas entrelazados, cifrado de las comunicaciones, entre otras, permitieron mejoras en cuanto a calidad, velocidad de transmisión, capacidad del sistema y la posibilidad de agregación de nuevos servicios como el buzón de voz, identificador de llamadas y mensajes de texto [4].

El sistema GSM utiliza la técnica de duplexado FDD, que opera inicialmente en la banda de frecuencias 890-915 MHz en el enlace ascendente y en 935-960 MHz en el descendente. Como técnica de acceso múltiple emplea FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) combinado con TDMA (*Time Division Multiple Access*). Es una combinación de división en tiempo y frecuencia, divide el espectro de 25 MHz en 124 portadoras con una canalización de 200 kHz por cada portadora. A su vez, cada canal de 200 kHz lo divide en 8 ranuras de tiempo. A pesar de que el sistema GSM fue originalmente creado para operar en la banda de 900 MHz surgieron variaciones en el sistema. Las más conocidas son la GSM-1800 y la GSM-1900, que fueron adoptados tanto por países europeos como no europeos [5].

En la Figura 2 se muestra de manera resumida la arquitectura de la red GSM. Esta arquitectura es más compleja y dispone de más elementos que los presentados en esta figura, pero la figura sirve para mostrar de forma resumida el arquitectura de red.

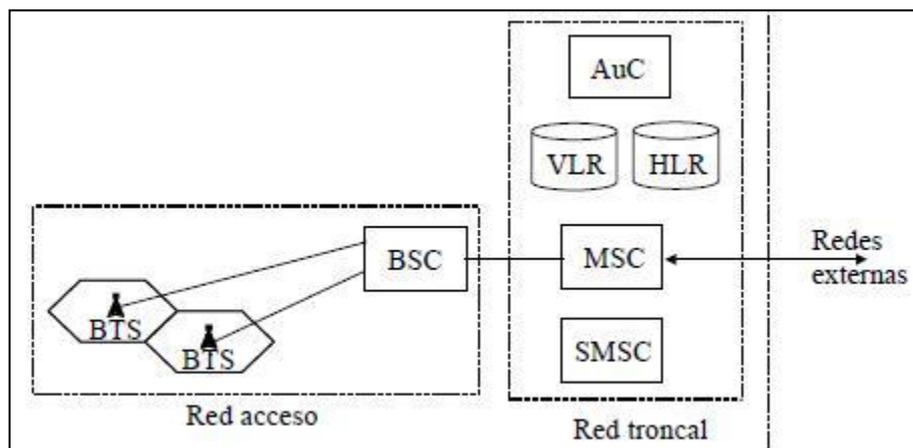


Figura 2. Arquitectura de la red GSM.

El éxito de la red GSM hizo que se extendiera rápidamente por todo el mundo, y con la aparición de los móviles que podían operar en las tres bandas de frecuencia disponibles (900, 1800, 1900 MHz), se hacía más fácil el empleo del servicio de *roaming* internacional permitiendo establecer comunicaciones en los cinco continentes. Cabe destacar que el sistema GSM es el que tuvo un mayor impacto a nivel mundial, pero también existen otros sistemas tales como IS-54, que posteriormente evolucionó a IS-136, e IS-95 desarrollados en Estados Unidos o el sistema PDC (*Personal Digital Cellular*), originalmente conocido como JDC (*Japan Digital Cellular*), desarrollado en Japón [6].

En Estados Unidos la motivación de avanzar a la segunda generación de comunicaciones móviles era diferente al caso europeo. En Estados Unidos sólo se había desarrollado un sistema de comunicaciones para la primera generación, el AMPS, con lo que los usuarios de telefonía móvil eran libres de moverse por todo el país sin problemas de compatibilidad. Por este motivo, la FCC ordenó que la segunda generación fuera compatible con la primera, aumentando la capacidad y reduciendo costes y tamaño. Al no poder llegar a una única solución se propusieron dos tecnologías de funcionamiento: el IS-54 desarrollado por la TIA (*Telecommunication Industry Association*), basado en FDMA/TDMA y el IS-95, desarrollado por Qualcomm, basado en FDMA/CDMA [7].

El sistema IS-54, también llamado D-AMPS (*Digital AMPS*) empezó a operar en Estados Unidos el año 1990 conjuntamente con el sistema AMPS, triplicando la capacidad de este último y utilizando la banda de 850 MHz. Este sistema utilizaba los canales de control analógico y digitalizaba los canales de voz. Posteriormente, este sistema evolucionó a uno completamente digital denominado IS-136, introducido en 1994, que además de usar la banda de 850 MHz era capaz de operar en la banda de 1900 MHz. Por otro lado, el sistema IS-95 fue introducido en 1993 en Estados Unidos y es utilizado en varios países asiáticos. Este sistema también era llamado CDMAOne y es el único sistema de segunda generación basado en CDMA (*Code Division Multiple Access*), tecnología de acceso múltiple que proviene del ámbito militar y que posteriormente se utiliza en los sistemas de tercera generación tales como UMTS [8].

2.1.2.2.1. Sistemas móviles de 2,5G

La digitalización permitió notables mejoras de los sistemas de segunda generación respecto a los de la primera, pero desde el punto de vista operacional solamente estaban siendo utilizados para el tráfico de voz. Las primeras versiones del sistema estaban orientadas a modo circuito, lo que permitía soportar la transmisión de voz de manera muy eficiente pero solamente algunos servicios de transmisión de datos a muy baja velocidad (9,6 – 14,4 kbps). Las tecnologías que surgieron para mejorar la velocidad de este enlace de datos son las que suponen una transición entre la segunda y tercera generación y son conocidas como 2,5G [9].

Algunas de estas tecnologías 2,5G que surgieron como evolución del sistema GSM fueron HSCSD (*High-Speed Circuit Switched Data*), EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*) o GPRS (*General Packet Radio Services*). Los sistemas implantados hasta entonces sufren cambios en este aspecto. Por ejemplo el sistema IS-136 se adapta a la tecnología 2,5G con la inclusión de GPRS y EDGE, y el sistema IS-95 es llamado 2,5G cuando implementa IS-95B o CDMA2000 [8].

El sistema HSCSD fue propuesto por la ETSI a principios de 1997 de forma que se pudiera utilizar de forma paralela más de un *time slot* para la transmisión de datos, de manera que la velocidad de transmisión total sería la capacidad de un *slot* GSM, multiplicada por el número total de *slots* empleados, con un máximo de 4. Este sistema funcionaba muy bien para aplicaciones en tiempo real, pero al seguir empleando conmutación por circuito, reducía drásticamente los recursos empleados para los usuarios de voz pues los canales debían ser reservados para un usuario durante el tiempo total de la conexión, sin saber si estaba transmitiendo o no.

Más adelante, la ETSI propuso el sistema GPRS como una extensión del sistema GSM para la transmisión de información utilizando la técnica de conmutación de paquetes. Esta técnica reparte los recursos entre varios usuarios, de manera que no se reserva únicamente para una comunicación. Como la asignación de los recursos en los enlaces ascendente y descendente se realiza de forma separada, de manera que los servicios de paquetes de datos se realizan de forma asimétrica [6].

El coste de la implementación del sistema GPRS es bajo ya que se trata de una extensión del sistema GSM, se usa todo el *hardware* dedicado a GSM añadiendo dos nuevos nodos SGSN (*Serving GPRS Support Node*) y el GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) para el tráfico de paquetes. También añade una unidad PCU (*Packet Control Unit*) en las BSC (*Base Station Controller*) que tiene la capacidad de que los canales sean asignados dinámicamente a GSM o a GPRS dependiendo de los niveles de tráfico dando siempre prioridad de servicios de voz. GPRS utiliza distintos esquemas de codificación dependiendo de la calidad del radio enlace, el tipo de terminal y el tráfico de datos de la celda (CS1: 9,05 kbps, CS2: 13,4 kbps, CS3: 15,6 kbps y CS4: 21,4 kbps) y permite utilizar varios *time slots* por conexión, con lo cual se lograría una velocidad máxima teórica de 171,2 kbps utilizando 8 *time slots* y el esquema CS4 [10].

En la Figura 3 se muestra la arquitectura del sistema de GSM/GPRS. A modo de resumen, la principal diferencia con el sistema de GSM es la adición de los módulos de SGSN y GGSN, que son los elementos encargados de llevar a cabo la conmutación de paquetes en la red GPRS. Proporciona funcionalidades similares a las realizadas por el nodo MSC/VLR en el sistema GSM. Las principales funciones del nodo SGSN están relacionadas con: red de acceso, gestión de movilidad, autenticación y registro de móviles, entre otras. Del otro lado, el módulo constituye la interfaz entre la red GPRS y las redes de paquetes de datos externas para el acceso a sus servicios y aplicaciones basadas en IP. Desde el punto de vista de la red externa, el GGSN es un router conectado a una subred, ya que oculta la infraestructura de la

red GPRS al resto de redes. Cuando recibe datos dirigidos hacia un usuario específico, comprueba si la dirección está activa, y en caso afirmativo, envía los datos al SGSN. Las principales funciones del nodo GGSN están relacionadas con: mantenimiento de los datos de usuarios, recepción de datos de usuarios, recogida de información sobre la sesión, asignación de direcciones IP, entre otras.

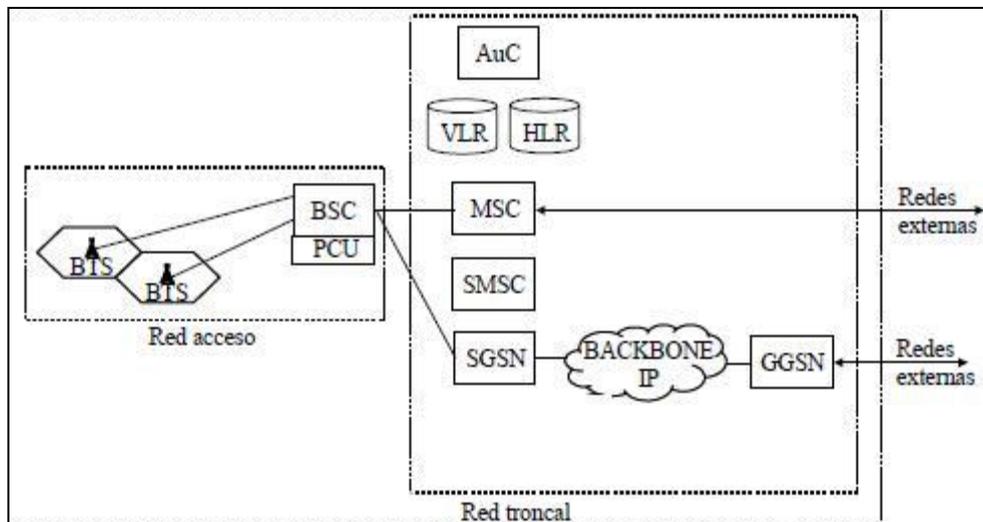


Figura 3. Arquitectura de la red GSM/GPRS.

El sistema 2,5G que surge para mejorar el sistema GSM/GPRS es EDGE. De la misma manera que GPRS complementa a GSM mediante una codificación adaptativa, EDGE complementa a GPRS con la inclusión de una modulación adaptativa. De esta manera, además de la modulación GMSK utilizada en GSM/GPRS, el sistema EDGE introduce la modulación 8PSK que permite triplicar la tasa de transmisión de datos de GPRS con el único aspecto negativo que reduce el área de cobertura. La máxima velocidad de transmisión de EDGE es de 384 kbps haciendo uso del total de los 8 *time slots* disponibles y el esquema de modulación/codificación más eficiente es MCS9 [8].

Los cambios principales introducidos por este sistema se encuentran a nivel de capa física y MAC/RLC. Esto provoca que la arquitectura de la red GPRS no necesite ninguna modificación salvo por la BTS, que requiere de una nueva unidad transceptora. Además debe actualizarse el *software* de la BTS para permitir la conmutación de GSM/GPRS a EDGE cuando sea necesario. Por último se requieren de unos terminales móviles que permitan codificar y decodificar los esquemas de modulación utilizados en EDGE [11].

El sistema IS-95 se rebautizó como IS-95B cuando se le aplicó la tecnología 2,5G. Paso de ofrecer velocidades de transmisión de datos a 14,4 kbps a ofrecer, utilizando conmutación de paquetes, 64 kbps utilizando múltiples canales de códigos ortogonales entre sí para un mismo usuario. Las primeras versiones del sistema CDMA2000 propuesto por la 3GPP2 (*Third Generation Partnership Project 2*) fueron consideradas tecnología de 2,5G: el CDMA2000 1xRTT release 0 alcanzaba velocidades de pico de 144 kbps y el sistema CDMA2000 1xRTT release A alcanzaba velocidades de pico de 384 kbps. Hay que destacar que la evolución de los sistemas IS-95 a los CDMA2000 de tercera generación es mucho más sencillo que el cambio equivalente GSM/GPRS/EDGE a UMTS, ya que permite que se pueda reutilizar la mayor parte de la infraestructura de red y las mejoras son casi siempre actualizaciones de *software* [8].

2.1.2.3. Sistemas móviles de tercera generación (3G)

De manera análoga al caso anterior, los sistemas de segunda generación fueron un éxito. Pero como en caso anterior, la demanda de tráfico y las expectativas de posibles desarrollos, tales como las aplicaciones multimedia, hacían insuficientes los sistemas de 2 y 2,5G. En este punto, la ITU (*International Telecommunication Union*) comenzó el desarrollo de un sistema de tercera generación universal, el sistema IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications*). En vista de no poder englobar los intereses de todos los países en un único sistema, el IMT-2000 pasó a conformar una familia de sistemas, como el UMTS europeo o el CDMA2000 estadounidense, entre otros de menos importancia [6].

El objetivo de los sistemas 3G era alcanzar unas tasas de 144 kbps para entornos vehiculares a gran velocidad, 384 kbps para espacios abiertos y de 2 Mbps para entornos interiores de poca movilidad. Esto permitía que los terminales adaptados a esta generación tuvieran una amplia gama de servicios asociados, desde llamadas telefónicas, acceso a Internet, envío de correos electrónicos, acceso a redes LAN corporativas, transferencias de archivos e imágenes de alta calidad, servicios de videoconferencia, entre muchas otras [4].

El primer sistema que se publicó fue el UMTS, en 1999, conocido como UMTS *Release 99*. En esta versión se pueden encontrar dos modos de operación para el acceso radio: el modo FDD usando la técnica de acceso múltiple W-CDMA (*Wideband CDMA*), donde el canal físico lo define un código ortogonal y una frecuencia, y el modo TDD (*Time Division Duplex*) empleando la técnica de acceso TD-CDMA (*Time Division-CDMA*), donde el canal físico lo define un código ortogonal, una frecuencia y un *time slot*. El uso de la técnica de acceso múltiple CDMA implica un cambio en la arquitectura de los sistemas GSM/GPRS/EDGE, donde se tiene la posibilidad de emplear un rehuso frecuencial de factor 1, controlando siempre las interferencias intercelulares, para obtener de esta manera una gran eficiencia espectral.

En la Figura 4 se muestra la arquitectura del sistema de UMTS en la R99. La tecnología UTRAN está formada por diversas capas totalmente independientes unas de otras, esto facilitaría en un futuro una posible modificación de una parte de esta tecnología sin necesidad de volver a crear otra de nuevo, solo bastaría con modificar algunas de sus capas. Los diferentes elementos que la componen son los siguientes: equipo de usuario y RNC (*Radio Network Controller*).

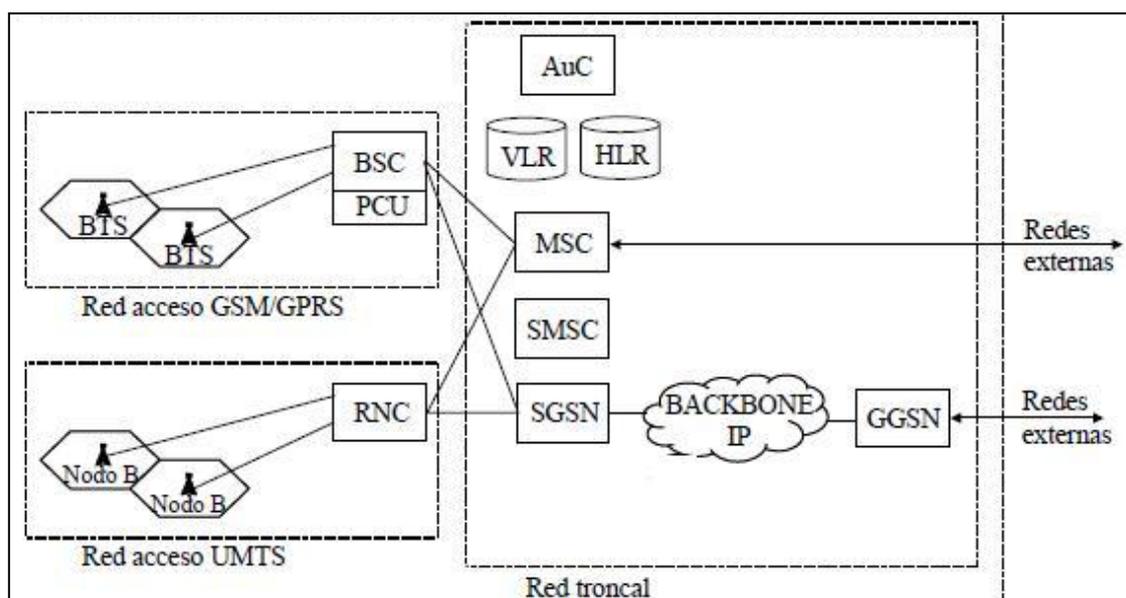


Figura 4. Arquitectura de la red GSM/GPRS +UMTS de la R99.

Las mejoras más importantes de las características del acceso radio UMTS se introdujeron en el *Release 5*, mediante la adición del HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) y en el *Release 6* con el HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*). El HSPA es una tecnología que mejora el tiempo de servicio entre paquetes introduciendo mayores velocidades y menores retardos. Asimismo, mantiene una buena calidad en la cobertura y en la capacidad del sistema. Para lograr esto, el HSPA introduce nuevos esquemas de modulación a mayor nivel, control rápido de potencia, *fast scheduling* y mecanismos de retransmisión híbrida HARQ con redundancia incremental. De esta manera se pueden lograr velocidades de 14,4 Mbps en el enlace descendente y de 5,7 Mbps en el enlace ascendente [12].

En la Figura 5 se muestran las diferentes *Releases* de la tecnología de UMTS. En ellas puede verse la evolución tecnológica que se ha ido realizando en diferentes fases a lo largo del tiempo.

Rel-99	Rel-4	Rel-5	Rel-6	Rel-7	Rel-8	Rel-9
1999						2009
FDD mode 3.84 Mcps TDD mode 3.84 Mcps	TDD mode 1.28 Mcps (TD-SCDMA)	High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA)	High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA)	HSDPA MIMO 64QAM Downlink 16QAM Uplink	Dual-Carrier HSDPA	Dual-Carrier HSUPA
			Fractional Dedicated Physical Channel (F-DPCH)	Continuous Packet Connectivity (CPC)		Dual-Carrier HSDPA + MIMO
			Multimedia Broadcast/ Multicast Service (MBMS)			Dual-Band HSDPA
		Downlink performance requirements for receive diversity	Downlink performance requirements for linear equalizer	Downlink performance requirements for rx diversity + equalizer	Downlink performance requirements for interference cancellation	
					Long-term evolution (LTE)	

Figura 5. Características principales de las diferentes *Releases* de UMTS.

Como ya se ha comentado anteriormente, el sistema de tercera generación CDMA2000 fue desarrollado por la 3GPP2 como una evolución del sistema IS-95, siendo compatible con el mismo. En el sistema CDMA2000 se incorporaron las tecnologías WCDMA/HSPA para mejorar las tasas de transmisión de datos y mejorar el rendimiento de la red. La evolución de este sistema se llevó a cabo en distintas fases. Primero surgió el CDMA2000 1xRTT, que posteriormente derivó a dos ramas paralelas, EV-DO (*Evolution Data-Only*) y el EV-DV (*Evolution for integrated Data and Voice*), siendo capaces de otorgar velocidades de transmisión superiores a 2 Mbps [12].

2.1.2.4. Sistemas de cuarta generación (4G)

Tal y como se ha comentado al principio del capítulo, el 87 % de la población mundial es usuario de la telefonía móvil. Pero ahora ya no bastan los terminales que solamente consigan establecer una comunicación punto a punto o que tengan asociado un servicio de mensajería. El continuo crecimiento de la demanda de los servicios de paquetes de datos, junto con la posibilidad de hacer cada vez terminales más avanzados, aptos para ofrecer aplicaciones con mayores capacidades (imagen, música, video y otras aplicaciones multimedia) es lo que ha llevado a la necesidad de crear una cuarta generación de comunicaciones móviles.

En este sentido, la ITU-R estableció los requisitos mínimos que debían cumplir las redes de esta nueva generación bajo el nombre de IMT-Advanced. Estos requisitos están dedicados a la nueva red, orientados a una red basada completamente en la conmutación por paquetes, con una arquitectura plana basada en el protocolo IP (*Internet Protocol*),

velocidades de transferencia de datos mayores a 100 Mbps para altas movilidades de 1 Gbps para entornos relativamente fijos, interoperabilidad con los estándares existentes, canalizaciones flexibles, menores tiempos de latencia, entre otros [13].

Tal y como muestra la Figura 6, han sido tres las organizaciones que se han encargado de desarrollar estándares de comunicaciones móviles con el fin de cumplir los requisitos del IMT-Advanced. La 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) empezó a definir el estándar LTE (*Long Term Evolution*) a finales del 2004, que evolucionó a LTE-Advanced a finales de 2008. Por otro lado, la IEEE creó la familia 802.16, conocida como WiMAX. Una rama de esta familia, la 802.16m, también conocida como WirelessMAN-Advanced, ha sido aprobada por la ITU-R como una tecnología IMT-Advanced. Por último, la 3GPP2 comenzó el desarrollo del sistema UMB (*Ultra Mobile Broadband*) como una evolución del sistema CDMA2000 con la intención de convertirse en 4G, pero el proyecto no se llegó a finalizar, dando esta organización su apoyo al estándar LTE.

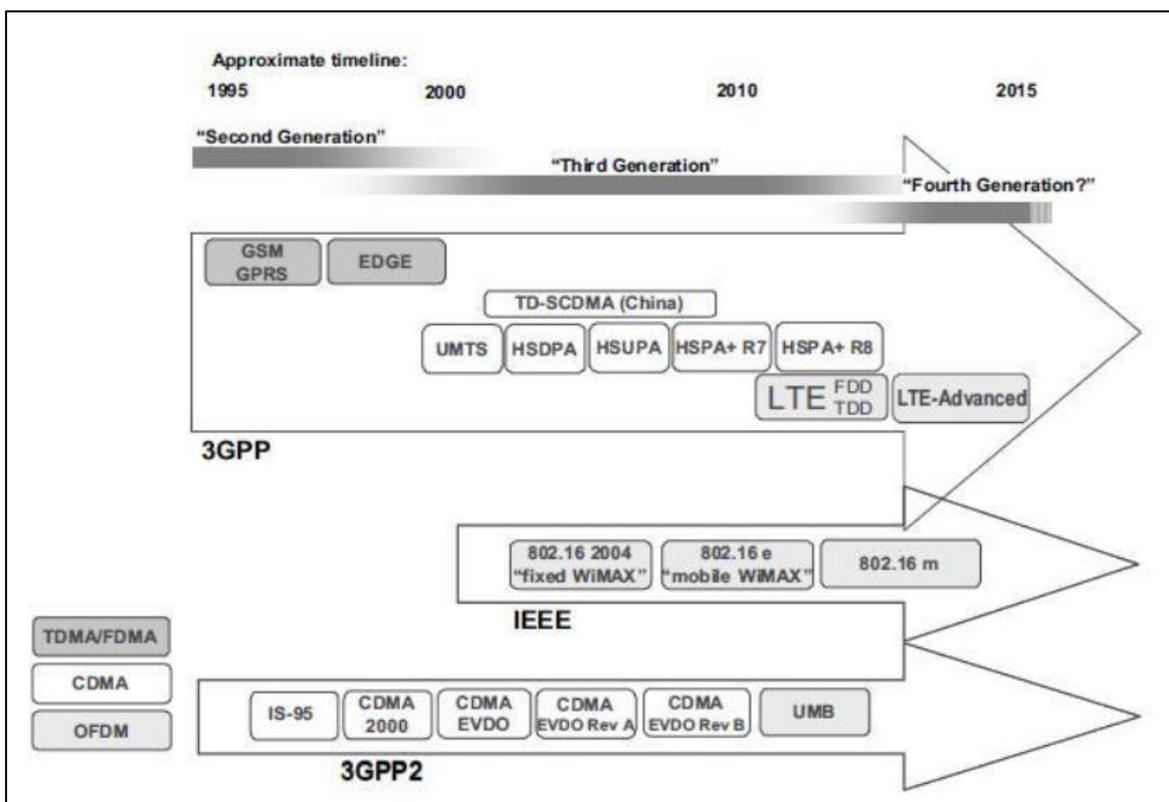


Figura 6. Estándares de las diferentes tecnologías de comunicaciones móviles.

Con esto se finaliza la exposición de las características más relevantes de cada una de las generaciones de comunicaciones móviles. A continuación se va a exponer el principio de operación de la tecnología LTE y las diferentes características de su sistema.

2.2. Sistema LTE

El sistema LTE fue diseñado por la 3GPP con la idea de incrementar en gran medida las capacidades que ofrecían las diferentes generaciones de comunicaciones móviles anteriores. El sistema LTE introduce gran variedad de modificaciones, pero quizá la más novedosa es la de ofrecer todos los servicios del sistema, incluida la voz, soportada sobre un protocolo de IP, dejando atrás conmutación de circuitos para pasar a un nuevo sistema basado completamente en conmutación de paquetes. Las velocidades que se pueden llegar a conseguir con la interfaz

radio de LTE también aumentan respecto a la anterior generación, llegando a un rango de 100Mbps y 1Gbps [14].

En este apartado se va a presentar la arquitectura del sistema LTE, la red de acceso y la red troncal, las tecnologías de transmisión a nivel físico que se utilizan en el enlace ascendente, SC-FDMA, y en el descendente, OFDMA, y se describirán las características principales de la interfaz radio del sistema.

2.2.1. Arquitectura del sistema LTE

La arquitectura del sistema LTE se diseñó en base a tres requisitos fundamentales: costes reducidos, baja latencia y únicamente la opción de usar conmutación de paquetes. Para conseguir esto se planteó una estructura plana sin nivel jerárquico con la menor cantidad de nodos e interfaces posibles. La arquitectura de este sistema (ver figura 7) comprende una nueva red de acceso denominada E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y una nueva red troncal denominada EPC (*Evolved Packet Core*). La combinación de estas dos redes recibe el nombre de EPS (*Evolved Packet System*) [14].

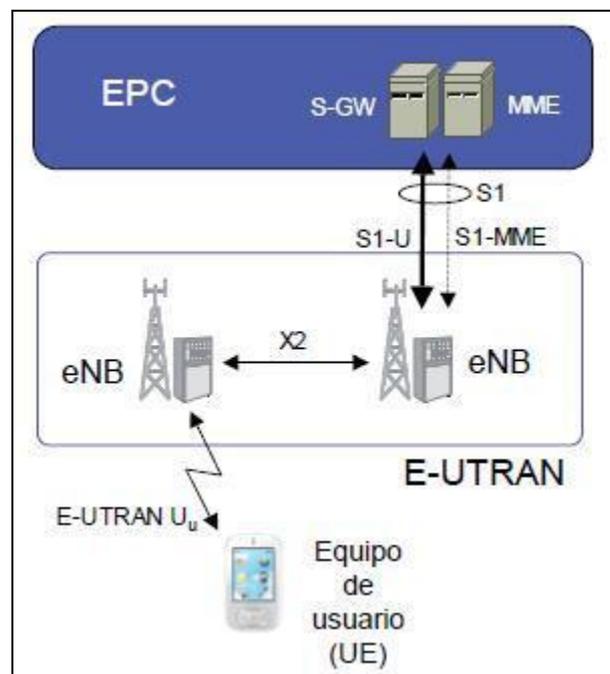


Figura 7. Arquitectura de la red LTE.

2.2.1.1. Red de Acceso E-UTRAN

La red de acceso LTE está formada por único elemento llamado *eNB* (*evolved NodeB*) que constituye la red E-UTRAN. Esta estación integra todas las funcionalidades de la red de acceso. Esto representa un cambio respecto a las anteriores generaciones, GSM y UMTS, ya que en estas, la red de acceso contenía además de las estaciones base un equipo controlador (BTS y BSC en GSM, NodeB y RNC en UMTS).

En la red de acceso E-UTRAN, al estar formada únicamente por estaciones base eNB, éstas serán las que proporcionen la conectividad entre los usuarios y la red troncal EPC, de allí que sea denominada una arquitectura plana.

Las funciones que realizan los eNBs incluyen la gestión de recursos radio (control de *Radio Bearers*, control de admisión radio, control de movilidad, *packet scheduling* y asignación dinámica de recursos tanto en el enlace *uplink* como en el *downlink*), comprensión de cabeceras, seguridad de interfaz radio y conectividad con la red troncal EPC.

Para llevar a cabo todas las funciones antes mencionadas, los eNBs deben estar interconectados a los equipos de usuario (*User Equipment*) mediante la interfaz Uu donde aplican los protocolos AS (*Access Stratum*). Asimismo, la interfaz que existe para conectar los eNBs entre sí es la X2. La otra interfaz que falta por mencionar es la S1, que conecta un eNB a la red troncal de EPC. Esta interfaz se divide en S1-MME para el plano de control y en S1-U para plano de usuario [15].

2.2.1.2. Red troncal EPC

La red troncal es la responsable de proporcionar un servicio de conectividad IP para permitir el servicio de las diferentes redes externas y plataformas de servicio [16]. Además debe controlar el establecimiento de los *Bearers* de los diferentes equipos conectados. El núcleo de la red troncal EPC está formado por tres entidades de red: MME (*Mobility Management Entity*), S-GW (*Serving Gateway*) y el P-GW (*Packet Data Network Gateway*), que junto a la base de datos principal del sistema, denominada HSS (*Home Subscriber Server*), constituyen los elementos principales para la prestación del servicio de conectividad IP entre los equipos conectados al sistema a través de la red de acceso E-UTRAN y las diferentes redes externas a las que se conecta la red troncal EPC [13].

Se definen a continuación las diferentes entidades de red mencionadas:

MME: es el elemento principal del plano de control de la red LTE para gestionar el acceso de los usuarios a través de E-UTRAN. Todo terminal que se encuentre registrado en la red LTE y sea accesible a través de E-UTRAN, tiene una entidad MME asignada. La elección de MME se realiza dependiendo de varios factores tales como la ubicación geográfica de terminal, así como criterios de balanceo de carga. Las principales funciones de esta entidad son:

- Autenticación y autorización del acceso de los usuarios a través de E-UTRAN.
- Gestión de los servicios portadores EPS (*EPS Bearer Service*). Encargada de gestionar la señalización que se necesita para establecer, mantener, modificar y liberar los servicios portadores.
- Gestión de movilidad de los usuarios en modo *idle* (son terminales que no tienen establecida ninguna conexión de control con E-UTRAN pero están registrados en la red LTE).
- Señalización para el soporte de movilidad entre EPS y otras redes externas.

S-GW: es la pasarela del plano de usuario entre E-UTRAN y la red troncal EPC. Como el caso anterior, todo usuario registrado en la red LTE posee una entidad S-GW en la red EPC a través de la cual transcurre su plano de usuario. Sus características principales son:

- Proporcionar un punto de anclaje en la red EPC con respecto a la movilidad del terminal de usuario entre eNBs.
- Este anclaje también se aplica para la gestión de la movilidad con otras redes de acceso del 3GPP (UMTS y GSM).
- Almacenamiento temporal de los paquetes IP de los usuarios en caso de que los terminales se encuentran en modo *idle*.

- Encaminamiento de tráfico de usuario. Esta entidad albergará la información y funciones de encaminamiento necesarias para dirigir el tráfico de subida hacia la pasarela P-GW que corresponda y el tráfico de bajada hacia el eNB.

P-GW: es el ente encargado de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas. Por lo tanto, un paquete IP generado por la red LTE inicialmente es invisible para la red externa, pero a través de la entidad P-GW se puede hacer “visible” para otras redes. Un usuario tiene asignado como mínimo una pasarela P-GW desde una pasarela P-GW desde su registro en la red LTE. Las principales características de esta entidad de red son las siguientes:

- Aplicación de reglas de uso de red y control de tarificación a los servicios portadores establecidos en el terminal.
- La asignación de la dirección IP de un terminal usada en una determinada red externa se realiza desde la pasarela P-GW que corresponda.
- Actúa de punto de unión para la gestión de la movilidad entre LTE y las redes externas no pertenecientes a 3GPP (WiMAX, WiFi, CDMA2000, etc.)
- El tráfico IP que transcurre a través de la pasarela P-GW es procesado a través de un conjunto de filtros que asocian cada paquete IP con el usuario y servicio EPS que corresponda.

HSS: es la base de datos principal que almacena los datos de todos los usuarios de la red. La información almacenada contiene todo lo relativo a la suscripción del usuario como lo necesario para la operatividad de la red. Esta base de datos es consultada y modificada desde las diferentes entidades de red encargadas de prestar los servicios de conectividad o servicios finales (desde el MME de red troncal y también de los servidores de control del subsistema IMS). La información almacenada en la HSS que se puede encontrar es la siguiente: identificadores universales de usuario, identificadores de servicio, información de seguridad y cifrado, información relacionada con la ubicación de un usuario en la red, etc. HSS se estandarizó en la R5 del 3GPP en base a la integración de dos entidades definidas en redes GSM y que se denominan HLR y AuC, a las que se les ha añadido funcionalidades adicionales necesarias para soportar el acceso y la operativa del sistema LTE.

2.2.2. Tecnologías de Acceso Múltiple

En este apartado se van a ver las diferentes tecnologías a nivel físico que se implementan en el sistema LTE y que permiten alcanzar mayores niveles de capacidad y eficiencia en los recursos radio empleados por sus predecesores. En el enlace descendente se usa la técnica de acceso múltiple denominada OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y para el enlace ascendente, la técnica denominada SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) [14].

2.2.2.1. OFDMA

La técnica de acceso múltiple OFDMA que se utiliza en el enlace descendente del sistema LTE ofrece la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. Por tanto es posible realizar diferentes transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes usuarios al viajar éstas en subportadoras diferentes.

Se consigue que un conjunto de usuarios puedan compartir el espectro de un cierto canal para aplicaciones de baja velocidad [16]. El acceso múltiple se consigue dividiendo el

canal en un conjunto de subportadoras que se reparten en grupos en función de la necesidad de cada uno de los usuarios. El sistema se realimenta con las condiciones del canal, adaptando continuamente el número de subportadoras asignadas al usuario en función de la velocidad que este necesita y de las condiciones del canal. Si la asignación se hace rápidamente, se consigue cancelar de forma eficiente las interferencias co-canal y los desvanecimientos rápidos. En la Figura 8 se representa del espectro de la señal OFDMA.

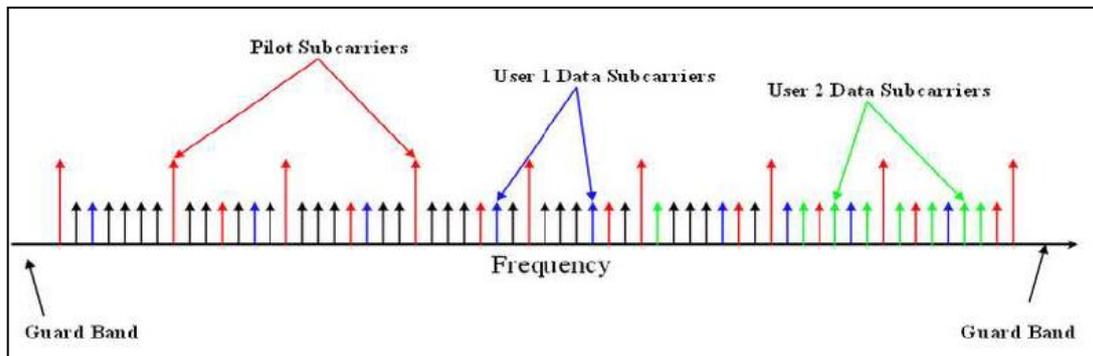


Figura 8. Espectro de la señal OFDMA.

Hay que destacar que no es necesario que las subportadoras sean contiguas. Los símbolos de un usuario pueden estar distribuidos aunque las subportadoras no sean contiguas. Ventajas del OFDMA:

- Diversidad multiusuario: la asignación de subportadora se realiza de manera dinámica. Como el canal radio presentará desvanecimientos aleatorios en las diferentes subportadoras, independientes entre usuarios, se intenta seleccionar para cada subportadora el usuario que presente mejor canal, es decir, el que tenga la mejor relación señal a ruido. Con esto se consigue mejorar la velocidad de transmisión y una mayor eficiencia espectral. A esta manera de actuar se la denomina *scheduling*.
- Diversidad frecuencial: es posible asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas, separadas suficientemente como para que el estado de canal de las mismas sea independiente, lo que proporciona diversidad frecuencial en la transmisión de dicho usuario ante canales selectivos en frecuencia.
- Robustez ante el *multipath*: gracias al uso del prefijo cíclico, esta técnica es muy robusta frente a interferencia intersimbólica (ISI), resultante de la propagación multicamino y se puede combatir la distorsión mediante técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, que resultan menos complejas que las técnicas desarrolladas en el dominio temporal.
- Flexibilidad en la banda asignada: esta técnica de acceso múltiple nos proporciona una forma sencilla de acomodar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de las necesidades de servicio requeridas por cada usuario, simplemente asignando un número diferente de subportadoras a cada usuario.
- Elevado grado de uso de la banda asignada: gracias a la utilización de la transmisión OFDM, la transmisión multiportadora se consigue con una separación mínima entre subportadoras, existiendo una superposición.
- Sencillez de implementación en el dominio digital: gracias al uso de la transformada rápida de Fourier (FFT e IFFT).

Algunas de las desventajas que presenta la implementación de este sistema son las siguientes:

- Elevada relación entre la potencia instantánea y la potencia media (PAPR).
- Susceptibilidad respecto a los errores en frecuencia.

2.2.2.2. SC-FDMA

En el sistema LTE se ha optado por utilizar la técnica OFDMA para el enlace descendente porque en la estación base se requieren técnicas que incrementan la complejidad computacional para reducir el PAPR de la señal OFDMA, y no es tan crítica la eficiencia ni los costes de los amplificadores de potencia. Sin embargo en el terminal del usuario sí que es crítica la acción de reducir el consumo de potencia y por lo tanto de una gran eficiencia en el amplificador, por lo que se ha optado por una técnica de acceso de portadora única, el SC-FDMA.

Esta técnica de acceso múltiple se basa en unos principios muy similares a los de OFDMA, pero en este caso se ejecuta una precodificación de los símbolos que se van a transmitir previa al proceso de transmisión OFDM, lo que nos permitirá reducir las variaciones en la potencia instantánea [15].

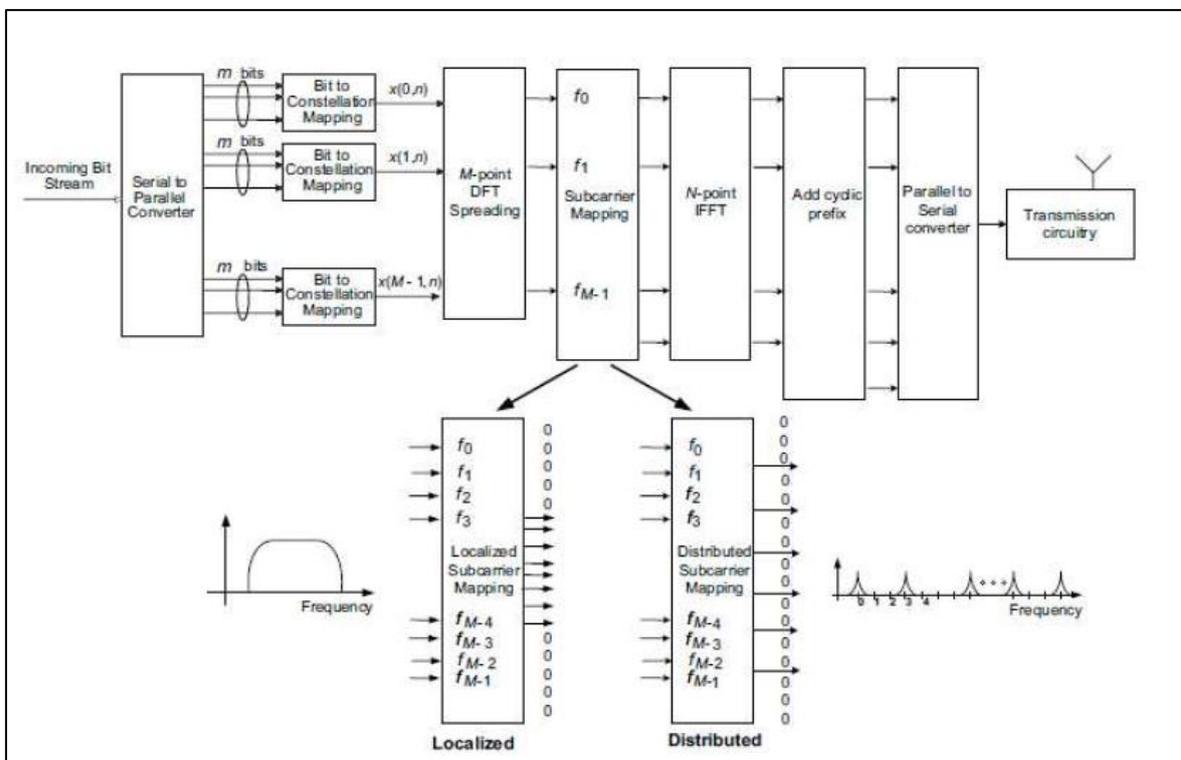


Figura 9. Esquema de transmisión SC-FDMA.

Como se muestra en la Figura 9, existen M símbolos a transmitir, los cuales son precodificados mediante una DFT de M muestras, como paso previo a efectuar la transmisión OFDM de acuerdo a una IDFT de N muestras, con una separación de subportadoras de Δf , con la consiguiente inclusión del prefijo cíclico.

Debido a que el proceso de precodificación está basado en la DFT, a esta técnica también se la denomina DFT-Spread OFDM (DFTS-OFDM).

En el esquema anteriormente mostrado, si el tamaño de la DFT, M , fuera igual al de la IDFT, N , los procesos DFT y IDFT se cancelarían entre sí, sin tener ningún efecto, por lo que la señal enviada sería simplemente el mismo conjunto de símbolos original, resultando en una señal en banda base, no modulada sobre las diferentes subportadoras, es decir, una señal

portadora única (*single carrier*) que presentaría mejores propiedades de PAPR que las señales multiportada.

Sin embargo, siempre que $M < N$ y el resto de las entradas al bloque IDFT estén puestas a cero, el resultado de este proceso será una señal que continua teniendo la propiedad de ser portadora única, cuyo ancho de banda $B = M\Delta f = Mf_m/N$ es regulable simplemente cambiando el valor de M . Esto nos permitirá tener cierta flexibilidad en la banda asignada.

Observando el esquema, se destaca que no es necesario ubicar las M muestras de salida de la DFT de forma contigua, sino que también es posible distribuirlas de forma equidistante de la IDFT, poniendo ceros en las posiciones intermedias. A este modelo se le denomina SC-FDMA “distribuido”, a diferencia del anterior, que se denomina “localizado”. El modelo distribuido proporciona una mayor diversidad frecuencial ya que la señal se distribuye entre subportadoras separadas.

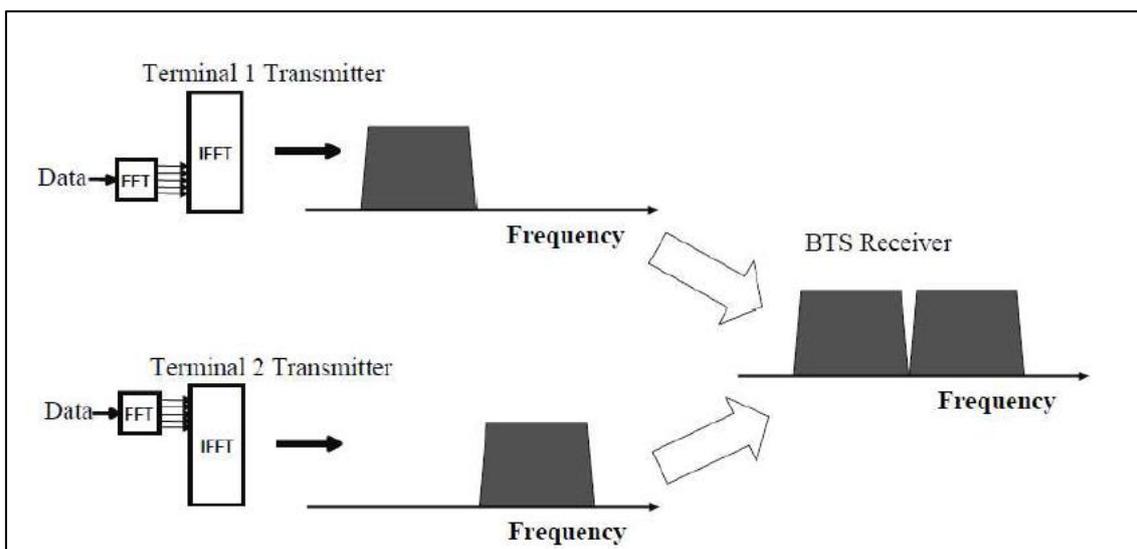


Figura 10. Multiplexación de los usuarios mediante SC-FDMA.

Destaca también cómo en el mecanismo de multiplexación de transmisión de diferentes usuarios en SC-FDMA para el enlace ascendente, manteniendo los parámetros a nivel de número de muestras de la IDFT, N , frecuencia de muestreo y separación de subportadoras, las transmisiones de los dos usuarios vienen ubicadas en diferentes entradas de la IDFT, de modo que en las posiciones de entrada en las que se ubica la transmisión del usuario 2, el usuario 1 inyecta ceros. Este proceso se repite de forma análoga para el usuario 1 respecto del 2. Esta técnica la se puede visualizar en la Figura 10. Como resultado se obtienen dos transmisiones que ocupan bandas frecuenciales diferentes. Mediante DFTs de diferentes tamaños se obtienen diferentes anchos de banda asignados a cada usuario, así, con $K1$, se tiene $K1\Delta f$ y con $K2$ se tienen $K2\Delta f$.

2.2.3. Conceptos de Interfaz Radio

En este apartado se va a especificar las características más importantes del interfaz radio del sistema LTE, su capa física, el concepto de *Physical Resource Block*, y los diferentes canales radio asociados a los enlaces.

2.2.3.1. Capa Física

La capa física de la interfaz radio del sistema LTE se basa en la utilización de técnicas de acceso múltiple OFDMA en el enlace descendente y SC-FDMA en el ascendente [14]. En ambos casos, la separación entre subportadoras es fija e igual a 15kHz. A continuación en la Tabla 1 se va a mostrar la canalización del sistema LTE en función del número de subportadoras.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Tamaño FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Subportadoras disponibles	73	181	301	601	901	1201

Tabla 1. Canalización en el sistema LTE.

La capa física del sistema LTE está diseñada para que el sistema opere en las bandas de UHF, es decir, por encima de los 450 MHz y hasta los 3,5 GHz. El estándar define hasta 40 posibles bandas de operación para trabajar en modo FDD o TDD. Las diferentes bandas en las que opera el sistema LTE se pueden encontrar en el anexo 1 del proyecto.

Los posibles esquemas de la modulación para el enlace descendente son: QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Para el enlace ascendente serán también QPSK, 16-QAM, 64-QAM dependiendo de la capacidad del terminal móvil.

2.2.3.2. Bloque Recursos Físicos (*Physical Resource Block*)

Se denomina PRB (*Physical Resource Block*) al mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil. Un PRB ocupa 180 kHz de banda, equivalente a 12 subportadoras equiespaciadas 15 kHz entre ellas. En él se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud del prefijo cíclico. La duración de un PRB es de 0,5 ms, es decir, la duración de un slot o ranura de tiempo.

En la siguiente tabla se muestra el número de PRB en función de la canalización.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRB	6	15	25	50	75	100

Tabla 2. Número de PRB en función de la canalización.

Destacar que el número de portadoras disponibles está relacionado con el número de PRBs de cada canal. Por lo tanto, el número de subportadoras es 12 veces el número de PRBs más una, ya que se considera la subportadora central (la de DC), que no se utiliza para transmitir información [16].

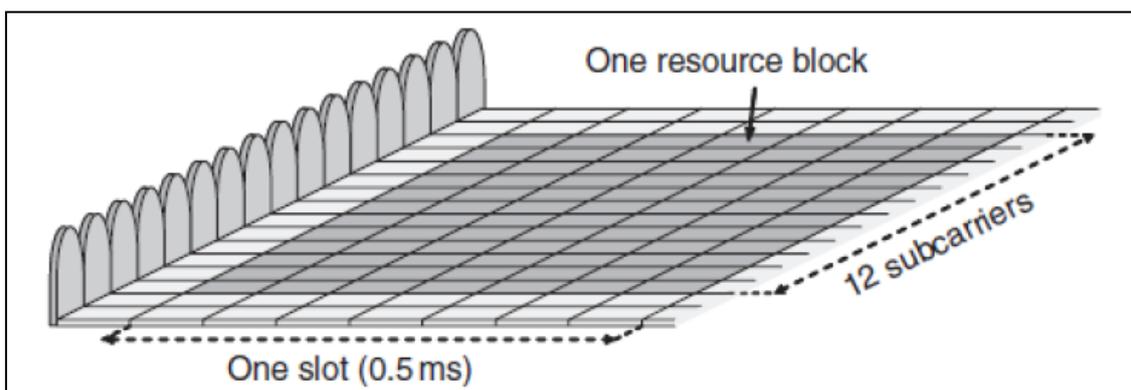


Figura 11. PRB de 7 símbolos con 12 subportadoras.

En un PRB se tienen como máximo 7 símbolos con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos, por lo que tenemos en total 84 recursos donde introducir los símbolos QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Considerando la modulación de mayor eficiencia espectral, 64-QAM en la que se transmiten 6 bits/símbolo, dentro de un PRB podremos enviar un total de 504 bits cada 0,5 ms, lo que nos ofrece una velocidad bruta de transmisión de pico de aproximadamente R_b , $PRB=504 \text{ bits}/0,5 \text{ ms} \approx 1 \text{ Mb/s}$. Se muestra un ejemplo en la Figura 11.

En la Tabla 3 se resumen las velocidades de pico en función de la canalización. Estos cálculos se han llevado a cabo sin tener presente la estructura MIMO.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Velocidad de pico total (Mb/s)	≈ 6	≈ 15	≈ 25	≈ 50	≈ 75	≈ 100
Velocidad de pico bruta (Mb/s) (El 15% de los recursos están destinados a control y señalización)	≈ 5,1	≈ 12,8	≈ 21	≈ 42,5	≈ 63,7	≈ 85

Tabla 3. Velocidades de pico en función de la canalización.

2.2.3.3. Canales Físicos

A diferencia de otros sistemas móviles como GSM o UMTS, el estándar LTE no contempla el uso de canales dedicados sino compartidos. Es decir, sólo se establecen cuando un usuario (cualquier terminal móvil) debe recibir datos destinados a él.

Además de los canales dedicados a la transmisión de datos por parte del usuario, para permitir una transmisión eficiente de esta información se necesitan los denominados canales físicos de control, que son los encargados de transportar una determinada señalización.

A continuación en la Tabla 4 se muestran los diferentes canales físicos, así como una breve descripción de cada uno de ellos, tanto en el enlace ascendente como en el descendente.

Dirección	Nombre del Canal	Descripción
Enlace Descendente <i>Downlink</i>	<i>Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)</i>	Transmite información de usuario y de control tanto dedicada como común.
	<i>Physical Multicast Channel (PMCH)</i>	Se utiliza para transportar información de difusión a redes de una sola frecuencia.
	<i>Physical Broadcast Channel (PBCH)</i>	Transporta información de radiodifusión básica de la red, que permite conexión inicial de un terminal móvil con la misma.
	<i>Physical Downlink Control Channel (PDCCH)</i>	Canal de control genérico que informa sobre los recursos en el enlace descendente asignados al PDSCH.
	<i>Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)</i>	Informa al terminal móvil sobre el número de símbolos utilizados para transmitir el PDCCH.
	<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)</i>	Transporta información de reconocimiento correspondiente a las transmisiones del enlace ascendente.
Enlace Ascendente <i>Uplink</i>	<i>Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)</i>	Transmite información de usuario y de control dedicada.
	<i>Physical Uplink Control Channel (PUCCH)</i>	Contiene información de control: transmite peticiones de asignación de recursos, reconocimientos del enlace descendente e información de la calidad del canal.
	<i>Physical Random Access Channel (PRACH)</i>	Envía un preámbulo para iniciar, por parte del móvil, el procedimiento de conexión al sistema.

Tabla 4. Canales físicos de un sistema LTE.

3. Metodología

En este capítulo se va a describir brevemente cada una de las fases del proyecto. Se quiere dar al lector una visión general del proyecto, antes de analizarlo con detalle a continuación.

3.1. Investigación Teórica

En una primera fase se realizó un estudio teórico acerca de la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles para ver el desarrollo de los mismos a lo largo de los años. Más tarde se profundizó en el estudio de la tecnología del sistema LTE, para entender su principio de operación y calibrar las diferencias en el principio de operación con sus antecesores.

3.2. Aprendizaje de la herramienta ATOLL

La segunda fase del proyecto consistió en la familiarización con la herramienta de simulación radio como ATOLL, en su versión 3.1.0. Para ello fue necesaria una lectura inicial del *User Manual Radio* para repasar los términos relacionados con las redes LTE y para familiarizarse con cada parámetro de relevancia para estas redes de que dispone el programa. Posteriormente, mediante el *Technical Reference Guide*, se realizó una familiarización, mediante su estudio, de todos los parámetros relacionados con las diferentes predicciones y simulaciones que se iban a realizar en el proyecto. El *Technical Reference Guide* contiene descripciones detalladas de los modelos, algoritmos y conceptos adoptados en ATOLL.

Posteriormente, y en base a unas prácticas anteriormente desarrolladas por el GRGM (Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles) del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, se realizó un estudio para realizar una primera aproximación del uso práctico de ATOLL. El objetivo de estas prácticas consistía en comprobar el comportamiento de la red, mediante la realización de diversas predicciones y simulaciones, al definir el estándar LTE.

Las predicciones y simulaciones han facilitado el análisis de diversos parámetros. De los diversos parámetros que ofrece analizar ATOLL, en el caso del presente proyecto los de mayor relevancia han sido los siguientes: nivel de señal, umbrales de selección de *Radio Bearers*, velocidad de datos en el canal de transmisión, niveles de señal versus ruido e interferencias, entre otros.

3.3. Despliegue y optimización de una red LTE en ATOLL

Una vez que se han conocido los diferentes parámetros, simulaciones y predicciones que nos permite hacer ATOLL, esta tercera fase está centrada en simular de manera eficiente una posible implementación del sistema LTE en la ciudad de Barcelona y estudiar su comportamiento.

Se ha llevado a cabo una primera implementación de red, basada en los estudios antes mencionados. Con esta implementación se ha conseguido una primera aproximación del diseño de la red final. Mediante diversas predicciones iniciales sobre la red, y para llevar a cabo el plan nominal propuesto, se ha procedido a una optimización, instalando algunas antenas nuevas y desconectando otras. Una vez optimizada la red, y haciendo un estudio a nivel básico de los diferentes parámetros de su rendimiento, se ha querido comprobar el efecto que tendría aplicar la tecnología MIMO en la red. Se ha propuesto diferentes alternativas para ver su impacto en la red.

3.4. Análisis de resultados obtenidos y líneas futuras

Esta última fase consiste en procesar y analizar los resultados obtenidos. Como ya se ha comentado, se ha realizado este plan nominal en dos fases diferentes: comprobando el impacto que tiene al aplicar la tecnología de multiplexación MIMO y otra dejándola sin aplicar. Para ver el impacto del uso de esta tecnología se ha estudiado las diferentes alternativas posibles (diversidad, multiplexación,...) y hacer una comparación entre ellas para comprobar qué tecnología podría ser la más eficiente en el momento de la implementación del sistema.

Por último se exponen las distintas conclusiones a las que se ha llegado y posibles líneas futuras para la investigación.

4. Desarrollo

En este capítulo se van a explicar con detalle todos los procedimientos expuestos en el capítulo de metodología referente al conocimiento de ATOLL. Dado que este proyecto final de carrera está basado en el uso de un software concreto, se necesita adquirir, previamente, las técnicas necesarias para aprovechar plenamente sus capacidades. Después se realizará un ejemplo de implementación y finalmente se introducirán las diferentes tecnologías de múltiples antenas, cuyo propósito ya se ha mencionado en el capítulo de metodología.

4.1. Aprendizaje de la herramienta ATOLL

ATOLL es un software para la planificación y optimización radio que permite a los operadores de comunicaciones móviles realizar el diseño y planificar sus redes y estudiar su comportamiento para optimizarlas de la mejor manera posible. No es hasta el 2008 que ATOLL cuenta con un módulo LTE, siendo pionero en su sector, que permite implementar con detalle y precisión las características de una red E-UTRAN. A partir de la versión 3.1.0 ATOLL ofrece la posibilidad de crear redes avanzadas de múltiples tecnologías (p.ej. GSM/UMTS/LTE o CDMA2000/LTE), ideal para aquellos operadores que deseen migrar sus redes hacia el LTE.

A continuación se explicarán los algoritmos, términos y definiciones de ATOLL necesarios para una correcta comprensión de este proyecto.

4.1.1. Diseño de una red LTE en ATOLL

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo correspondiente al diseño de una red LTE con la herramienta ATOLL.

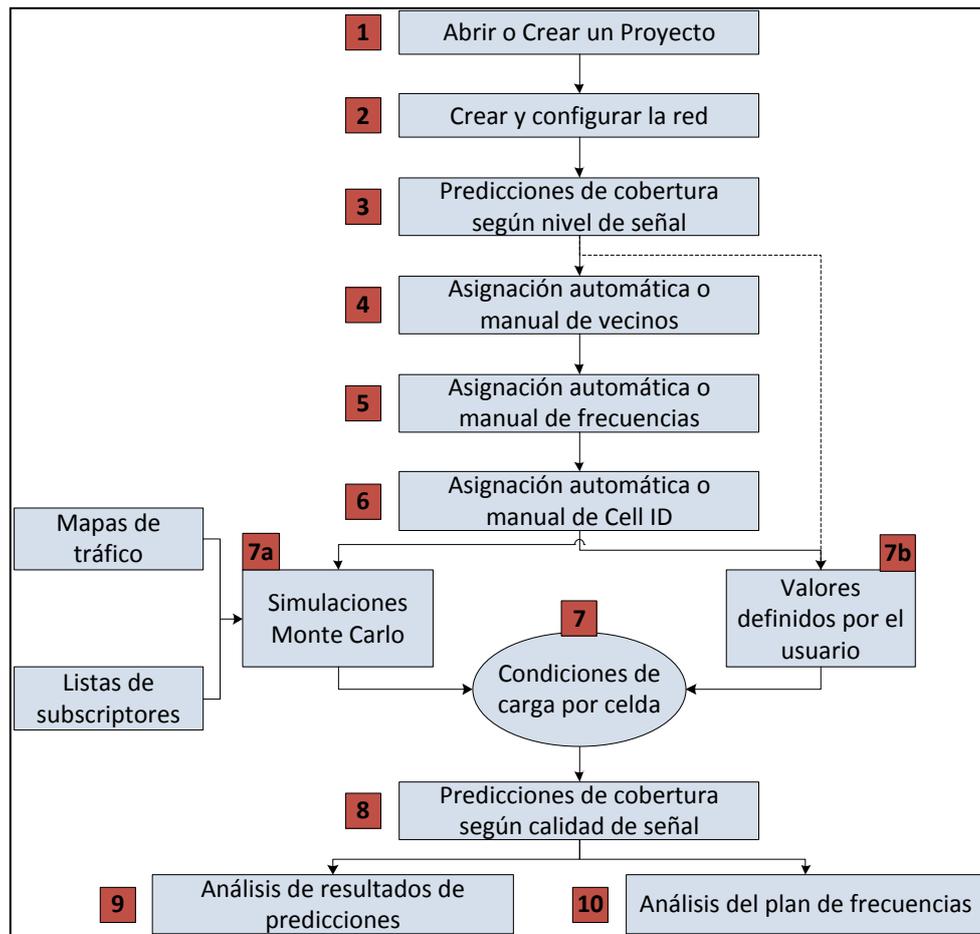


Figura 12. Pasos que se tienen que seguir para una correcta planificación de una red para el sistema LTE.

Fuente: extraído de [18].

La primera tarea que tiene cualquier proyecto es la recolección de toda la información necesaria para desarrollar el proyecto correctamente. Se ha recogido información de los equipos radio (sus emplazamientos, transmisores, antenas,...), información de la tecnología radio a emplear, en nuestro caso LTE (bandas de frecuencia asignadas, anchos de banda, radio bloques,...) y por último se ha recogido información de la situación geográfica del área donde se va a hacer el despliegue.

El segundo paso para el desarrollo del proyecto es su creación. Para ello ATOLL dispone de unas plantillas (*Templates*) en las que se pueden introducir los parámetros característicos de cada tecnología. En nuestro caso hemos escogido el nombre de *Plantilla LTE* que proporciona ATOLL, introduciéndole los parámetros correspondientes, según el modelo propuesto por el 3GPP.

El tercer paso es la configuración de la red agregando los mapas del terreno escogido, los emplazamientos (*Sites*), las celdas (*Cells*), los transmisores (*Transmitters*) y toda la información que hemos recopilado en el primer paso.

Una vez introducidos los datos de nuestro proyecto, procedemos a realizar simulaciones y predicciones. ATOLL ofrece la posibilidad de conocer diversos parámetros del funcionamiento de la red. Se pueden realizar cálculos de cobertura, de señal recibida y de

overlapping para conocer el estado inicial de la red, junto con muchos otros. Estos estudios de cobertura inicial pueden realizarse sin tener en cuenta las interferencias.

El cuarto paso es el de la asignación de vecinos. En este paso se calculan y establecen las colindancias entre celdas E-UTRAN. ATOLL ofrece la posibilidad de realizar este paso de manera manual (localizando la estación móvil donde nosotros deseamos) y de forma automática (asignando vecinos según la distancia con la estación base, con un máximo de hasta 16), siguiendo las instrucciones de la herramienta ANP – *Authomatic Neighbour Planning*).

Una vez realizada la asignación de vecinos procederemos a asignar las frecuencias. Este es el quinto paso de la planificación de red. Se asignarán bandas de frecuencia y números de canal para intentar minimizar las interferencias en la red que se está diseñando. Podemos hacerlo de manera manual o automática, acudiendo a la herramienta AFP – *Automatic Frequency Planning*.

El sexto paso es el de asignar identificadores de celda (*cell ID*). Realizamos esta operación para optimizar los procesos de selección de celda. También es posible realizar el proceso de forma manual o de forma automática.

Para realizar unas predicciones de cobertura más adecuadas es necesario conocer la información de carga de tráfico de las celdas que conforman la red. Este es el séptimo paso de nuestra planificación. Para ello tenemos dos opciones, o realizar simulaciones de Monte Carlo, basadas en mapas de tráfico, o se pueden definir los valores manualmente.

El siguiente paso, que será el octavo para un correcto diseño de la red, realizaremos las predicciones de calidad de la señal y coberturas específicas para una red de E-UTRAN. En este punto vamos a realizar las predicciones de cobertura en función de la señal recibida tomando como carga base de tráfico la calculada en los apartados anteriores. En particular se podrá estudiar la cobertura por nivel de portadora a interferencia, por celda servidora, por *throughput* o por indicadores de calidad.

Ya para acabar, el último paso es la identificación de puntos de optimización mediante el análisis de los informes de los resultados y el análisis de la planificación de frecuencia. En este paso se estudiarán las predicciones de cobertura de calidad de la señal recibida y si es necesario se modificarán los planes de asignación de frecuencias, ya que las interferencias suelen ser el elemento limitante en redes E-UTRAN. Tras modificar el plan de frecuencias se tienen que repetir los pasos séptimo y octavo.

4.1.2. Predicciones de cobertura

Existen dos tipos de predicciones de cobertura en ATOLL, las que permiten analizar los niveles de señal y las que permiten analizar la calidad de la señal. Las primeras son unas predicciones independientes de la carga de tráfico mientras que las segundas dependen tanto de las condiciones de carga de la celda como de sus interferencias.

En las predicciones cada píxel del mapa es considerado como un usuario no interferente con un servicio, movilidad y terminal asignado que se definen en el momento de realizar la predicción. Para el servicio, se toman en cuenta los valores de *Bearer* máximo y mínimo que puede emplear el servicio, así como el *Throughput Scaling Factor*, *Throughput Offset* y las pérdidas de cuerpo. La movilidad determinará los umbrales de selección de *Bearer*s

y las curvas de calidad de los equipos de recepción empleadas en el cálculo, ya que los requisitos de $C/(I+N)$ para la selección de diferentes *Radio Bearers* depende en gran medida la velocidad del terminal. Por último, el tipo de terminal influye tanto que la figura de ruido establecida afectará los cálculos del ruido total en el canal de bajada, así como el número de antenas afectará a los casos en los que se empleen técnicas de diversidad.

Las predicciones de calidad de la señal se basan en los valores de *DL Traffic Load* y *UL Noise Rise* establecidos en la tabla de las celdas (*Cells Table*) o son calculados por simulaciones de Monte Carlo para medir la relación entre portadora a interferencia más ruido, $C/(I+N)$, en cada píxel del mapa. Es importante resaltar que aunque ATOLL permita definir un valor para el *UL Traffic Load*, este sólo es un indicador de la carga de tráfico en las celdas en *uplink* pero únicamente el *UL Noise Rise* es tomado en consideración a la hora de realizar las predicciones.

La siguiente tabla nos muestra las diferentes predicciones que pueden realizarse en ATOLL, así como una breve descripción de cada una de ellas.

Clasificación	Nombre	Descripción
Por nivel de señal	Coverage by Transmitter	Permite predecir el área de cobertura de un transmisor analizando el mejor transmisor en cada píxel del mapa.
	Coverage by Signal Level	Permite predecir las zonas de cobertura por la intensidad de la señal del transmisor en cada píxel del mapa.
	Overlapping Zones	Una zona de solapamiento se compone de los píxeles cubiertos por al menos dos transmisores.
	Effective Signal Analysis	Permite analizar el nivel de señal de distintos tipos de señales LTE tanto en DL como en UL.
Por calidad de señal	Coverage by $C/(I+N)$ Level	Permite analizar los niveles de interferencia y de portadora a interferencia y ruido para cada píxel.
	Service Area Analysis	Permite calcular y mostrar los mejores servicios portadores radio disponibles basándose en la $C/(I+N)$ en cada píxel.
	Effective Service Area Analysis	Permite mostrar las zonas donde un servicio se encuentra disponible tanto en DL como en UL.
	Coverage by Throughput	Permite calcular y mostrar el throughput y la capacidad de celda basándose en la $C/(I+N)$ en cada píxel.
	Coverage by Quality Indicator	Permite calcular y mostrar indicadores de calidad (BLER, BER) basándose en la $C/(I+N)$ en cada píxel.

Tabla 5. Predicciones de cobertura disponibles en ATOLL.

4.1.3. Simulaciones de Monte Carlo

Las simulaciones de ATOLL corresponden a una instantánea de la red para una distribución de usuarios dada. Los datos más relevantes para una simulación son la

distribución geográfica de los usuarios con sus demandas de tráfico, asignación de recursos y cargas de tráfico en las celdas.

Una vez realizada una simulación puede visualizarse en el mapa (ver Figura 13) así como también existe la posibilidad de desplegar las tablas que muestran las estadísticas de las simulaciones y los datos relacionados con los *Sites*, *Cells* y *Mobiles*.

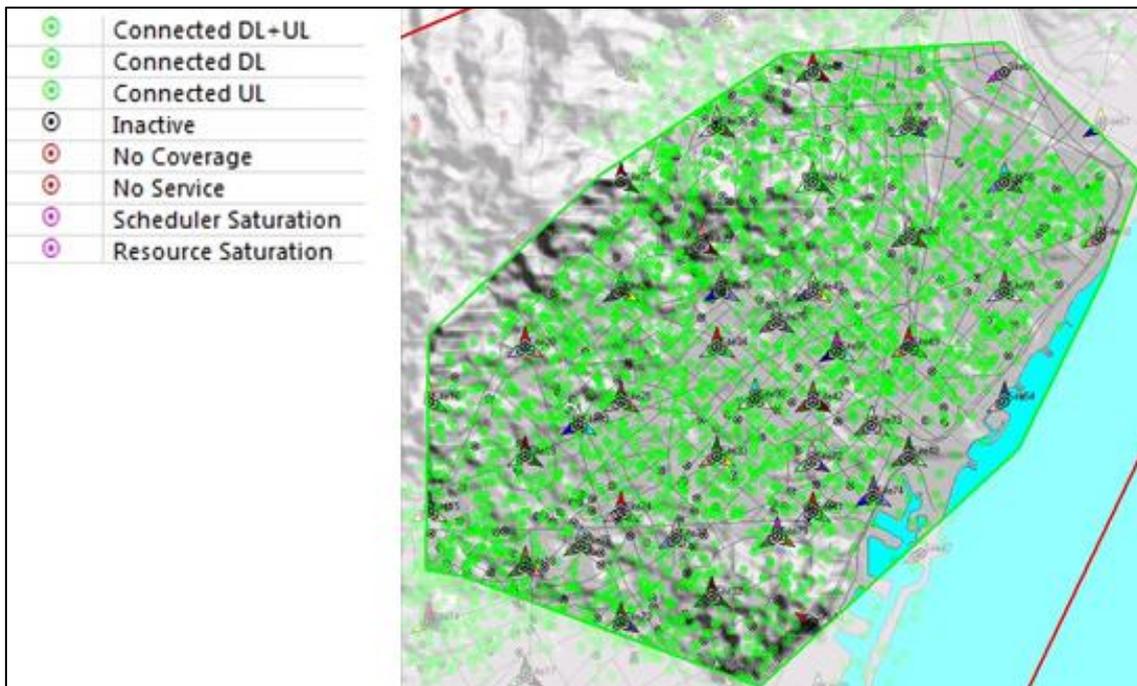


Figura 13. Ejemplo de simulación en el mapa de ATOLL.

La forma en la que ATOLL realiza las simulaciones de las redes LTE la podemos ver en el algoritmo de la Figura 14. Los pasos a seguir son:

1. Generación y distribución de usuarios

ATOLL genera una distribución de usuarios única cada vez que realizamos una simulación mediante el algoritmo de Monte Carlo. Estos usuarios son generados mediante una distribución de Poisson basándose en los mapas de tráfico asignado, ya que estos son los que tienen información del entorno (*Environment*) para cada píxel del mapa. Como veremos más adelante cada *Environment* contiene a su vez información de los perfiles de usuarios con sus movilidades y densidades asociadas.

En este sentido, cada usuario generado tiene asignado un servicio, una movilidad y un tipo de terminal adecuado al perfil de usuario asignado anteriormente. Una vez realizada la simulación, a cada móvil se le asignará un *status* (inactivo, activo en DL, activo en UL, o activo en DL y UL, como hemos podido ver en la leyenda de la Figura 13) de acuerdo con las probabilidades de actividad de cada servicio. Cuando procedamos a realizar predicciones con una simulación ya realizada, este *status* influye de manera directa en el cálculo de dichas predicciones.

Posteriormente se calculan los valores de EPRE (*Energy per Resource Element*) de los canales a partir de la potencia máxima de los transmisores, se inicializan los valores de

potencia de transmisión de los terminales a la máxima definida y los valores de carga de las celdas se inicializarán según como estén establecidos en el *Cell Table*.

2. Determinación de la mejor celda servidora

En este punto se determina la mejor celda servidora para cada móvil según los niveles de señal recibidos en *downlink* según las señales de referencia de los diferentes transmisores. Se seleccionará aquella que tenga el mayor nivel de potencia recibida.

3. Determinación del área de servicio

Para cada móvil se determinará la mejor área de servicio en la celda asignada para comprobar si es realmente su mejor servidor. Para ello, se debe cumplir que la EPRE de la señal de referencia recibida por el móvil sea mayor o igual al mínimo RSRP (*Received Reference Signal Energy per Resource Element*) definido para cada celda.

4. Cálculos en *downlink*

Se calcula el $C/(I+N)$ de las señales de referencia: SS, PBCH, PDSCH, PDCCH para cada móvil en el *downlink* y se determina el mejor *Bearer* disponible según la $C/(I+N)$ del canal PDSCH, se calcula el *Channel Throughput* en la ubicación del móvil, se realiza la asignación de los recursos de los usuarios de cada celda de acuerdo a las prioridades de los servicios y las demandas de *Throughput*. Por último, se calcula el *User Throughput* de cada usuario según los recursos que le fueron asignados.

5. Cálculos en *uplink*

De una forma similar al caso anterior, en el *uplink* se calcula la $C/(I+N)$ de los canales PUSCH y PUCCH, se determina el mejor *Bearer* disponible según la $C/(I+N)$ de los canales PUSCH, PUCCH, se realiza un control de potencia para el *uplink*, se calcula el *Channel Throughput*, se lleva a cabo una asignación de recursos y se calcula el *User Throughput* de cada usuario.

6. Resultados

Una vez que se han asignado los recursos a todos los usuarios se actualizan los valores del *Traffic Load* y *UL Noise Rise* de acuerdo con la cantidad total de recursos en uso en cada celda. De acuerdo con los valores de *UL Noise Rise* y *Max UL Noise Rise* de cada celda se realiza un control de potencia de transmisión de los móviles de las celdas vecinas para ser tomados en cuenta en las siguientes iteraciones.

Cuando los resultados superan la prueba de convergencia, finaliza la simulación y se muestran los resultados. Los principales resultados que se obtienen son: *Downlink Traffic Loads*, *Uplink Traffic Loads*, *Uplink Noise Rise*, *Downlink ICIC ratio*, *Uplink ICIC noise rise*, *Downlink AAS usage*, *Uplink MU-MIMO capacity gain*, *Maximum PUSCH $C/(I+N)$* , *Number of connected users in downlink* y *Number of connected users in uplink*.

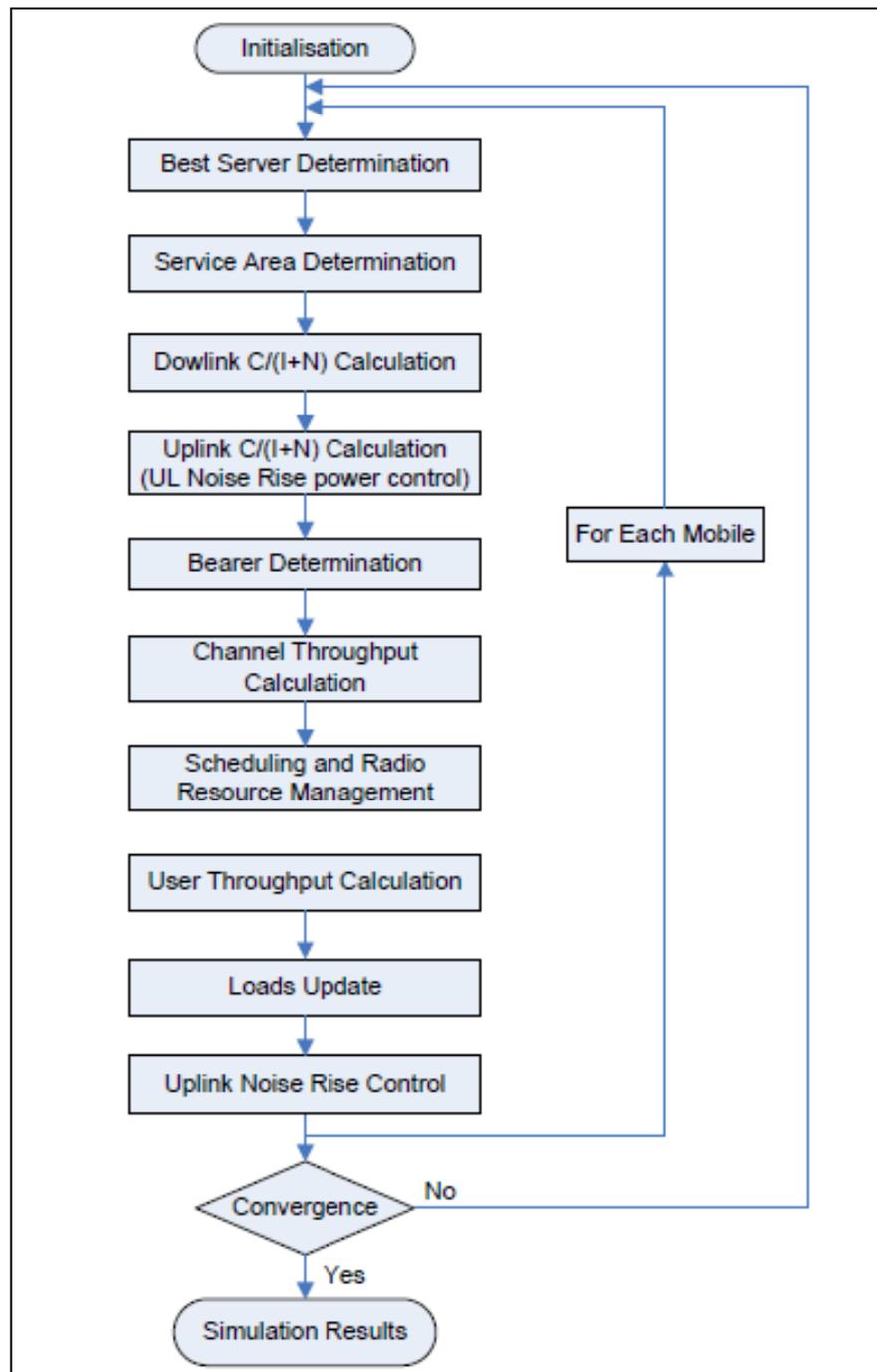


Figura 14. Algoritmo de las simulaciones LTE en ATOLL.

Fuente: extraído de [17].

4.1.4. Cálculo de *Throughputs*

El cálculo de *Throughput* se puede realizar teniendo en consideración diferentes aspectos. Se puede a nivel de celda como de usuario, considerando el valor de pico o el efectivo. Los diferentes casos son los que se citan a continuación.

- Peak RLC Channel/User Throughput: se refiere al máximo throughput de la capa RLC (de canal o usuario) que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible. Es la tasa de datos bruta sin considerar los efectos de retransmisión debido a errores, ni la codificación y encriptación de las capas superiores.

- Effective RLC Channel/User Throughput: es el throughput neto de la capa RLC (de canal o usuario) que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible tomando en consideración la reducción de throughput debido a la retransmisión por errores.
- Application Channel/User Throughput: es el throughput de la capa de aplicación (de canal o usuario) que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible tomando en consideración la reducción de throughput debido a la información de encabezados PDU/SDU, bits de relleno, encriptación y codificación.
- Channel Throughput: corresponde al Peak RLC, Effective RLC o Application Throughput que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible con la cantidad total de recursos de la celda (downlink o uplink).
- Allocated Bandwidth Throughputs: corresponde al Peak RLC, Effective RLC o Application Throughput que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible con el número de subcanales calculado.
- User Throughputs: corresponde al Peak RLC, Effective RLC o Application Throughput que puede ser obtenido en una determinada ubicación utilizando el Radio Bearer más alto disponible con el número de recursos asignados a un usuario por el scheduler.

4.1.5. Técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output)

En ATOLL es posible modelar los sistemas MIMO en las redes LTE utilizando diversas técnicas de transmisión y recepción que se clasifican de la siguiente manera:

- Diversidad en Transmisión y Recepción

Esta técnica consiste en emplear más de una antena en transmisión y/o recepción para enviar y recibir más de una copia de la misma señal. En el receptor las señales recibidas son combinadas constructivamente, con lo que el nivel de señal es más resistente a interferencias de lo que sería propiamente la señal sola. En los sistemas reales se logra la combinación de señales mediante el método de combinación por selección óptima o combinación MRC (*Maximum Ratio Combining*), sin embargo, en ATOLL se modela mediante la ganancia de diversidad que establece el usuario, incrementando directamente la $C/(I+N)$ de la señal en el receptor.

De esta manera, en ATOLL se puede definir para cada celda el tipo de diversidad que emplea así como las ganancias en los enlaces tanto ascendente como descendente para los equipos receptores en función de diferentes combinaciones de números de antenas de transmisión y recepción, movilidades, *Radio Bearers* y BLER.

Volviendo a realizar las simulaciones para $C/(I+N)$, aquellos usuarios que utilicen un terminal MIMO y que estén conectados a una celda que utilice diversidad en transmisión y/o en recepción, verán incrementado la relación señal respecto ruido e interferencias por la ganancia de diversidad.

- Multiplexación espacial o *Single-User MIMO (SU-MIMO)*

La técnica *SU-MIMO* consiste en emplear más de una antena en transmisión para enviar diferentes señales por cada una. El receptor también tiene la posibilidad de emplear más de una antena para recibir esos *streams*. Al utilizar *SU-MIMO* con M antenas transmisoras y N receptoras, teóricamente, se podría incrementar el *throughput* M o N veces, limitado por el valor menor, en el enlace del transmisor a receptor.

Al igual que en el caso de diversidad en transmisión-recepción, se podrá definir para cada celda, de forma independiente, si se emplea *SU-MIMO*. Las ganancias se definen en los equipos de recepción en función de: número de antenas transmisoras y receptoras, movilidades, *Radio Bearers* y BLER.

Durante los cálculos de las simulaciones, los usuarios que tengan un terminal MIMO y que estén transmitiendo en una celda que emplee *SU-MIMO* verán incrementados sus niveles de la $C/(I+N)$ de los canales PDSCH o PUSCH, y como consecuencia, el *Channel Throughput* aumentará.

- *Adaptative MIMO Switch (AMS)*

ATOLL permite el uso de esta técnica para conmutar entre el uso de *SU-MIMO* y diversidad en transmisión y recepción en función de la calidad del canal. En este sentido, los usuarios que tengan una $C/(I+N)$ superior a un umbral definido como *AMS Threshold* podrán beneficiarse de las ganancias de *SU-MIMO*, mientras que aquellos que se encuentren por debajo del umbral aplicarán las ganancias de diversidad en transmisión y recepción.

- *Multi-User MIMO (MU-MIMO)*

En ATOLL, el *MU-MIMO* es una técnica que puede ser empleada en *uplink* en aquellas celdas que tengan más de una antena receptora. Esta técnica consiste en multiplexar a dos usuarios que presenten buenas condiciones de canal (por encima de un umbral definido en ATOLL, el *MU-MIMO Threshold*) en un mismo recurso en el dominio frecuencia-tiempo. Esta técnica proporciona un incremento considerable de las capacidades de las celdas en el enlace ascendente y puede ser aplicada aun cuando los terminales de los usuarios solamente estén compuestos por una antena.

Las ganancias por *MU-MIMO* pueden definirse directamente en el *Cells Table*. Al usar la técnica *MU-MIMO*, es posible asignar recursos sobre dos tramas paralelas multiplexadas espacialmente en el mismo plano frecuencia-tiempo. Para ello, un móvil conectado a la antena 1 crea una cantidad de recursos virtuales disponibles en la segunda antena que serán asignados al siguiente usuario sin incrementar el tráfico total de la celda. De esta manera, cada nuevo móvil que se conecta consume los recursos virtuales hechos disponibles por el móvil anterior y, si es necesario, consumirá nuevos recursos reales creando al mismo tiempo nuevos recursos virtuales en la otra antena. La ganancia *MU-MIMO* resultante es la relación entre los *Traffic Loads* de todos los móviles conectados a las dos tramas paralelas en el *uplink* y el *UL Traffic Load* de la celda. Para las predicciones de cobertura, los *Channel Throughputs* son incrementados por la ganancia en cada píxel del mapa que emplee esta diversidad.

4.2. Planificación de una red LTE en ATOLL

Una vez que se han explicado aquellos elementos necesarios de ATOLL para la comprensión de este proyecto, en el siguiente apartado se detallarán los pasos necesarios para la planificación de un red LTE en ATOLL.

4.2.1. Despliegue de la red

Como ya hemos mencionado con anterioridad, ATOLL es una herramienta que permite planificar múltiples tecnologías de comunicaciones móviles, en nuestro caso se ha creado un proyecto del tipo LTE seleccionando la opción *Template LTE*.

Este proyecto está enmarcado en la zona geográfica de Barcelona, que es donde se va a realizar el despliegue. A partir de este momento se importaron los mapas de altimetría (*Height*), ortofoto (*Image*), vectorial (*Vector*) y del uso del terreno (*Clutter Classes*) correspondientes a la ciudad de Barcelona con una resolución de 20m.

Antes de poder definir los *Sites*, *Transmitters* y *Cells* se ha creado una plantilla LTE tomando como base una definida por defecto: *5MHz – Urban (3 sectors)*. Creamos ésta plantilla para que todos los transmisores de la red tengan las mismas características de trabajo. Las características de la plantilla son las especificadas en la siguiente tabla:

	Parámetro	Valor
General	Sectors	3
	Hexagon radius	550 m
	1st sector azimuth	0°
	Height/ground	30 m
	Mechanical downtilt	0°
	Additional electrical downtilt	0°
	Main antenna model	65deg 18dBi 4Tilt 2100MHZ
	Number of antenna ports (transmission)	1
	Number of antenna ports (reception)	1
	Main propagation model	Default model (Cost-Hata)
	Main radius	4000 m
	Main resolution	20 m
Transmitter	TMA	Default TMA Equipment
	Feeder	½" at 2100MHz
	Transmitter equipment	Default e-nodeB Equipment
	Feeder length (transmission)	5 m
	Feeder length (reception)	5 m
	Miscellaneous losses (transmission)	0 dB
	Miscellaneous losses (reception)	0 dB
	Total losses (transmission)	1,51 dB
	Total losses (reception)	-2,09 dB
Noise figure	4 dB	
LTE	Max power	40 dB
	SS, PBCH, PDCCH, PDSCH offsets	0 dB
	Frequency band	2110 FDD – 5 MHz (E-UTRAN Band 1)
	Reception equipment	Default Cell Equipment
	Scheduler	Round Robin
	Max number of users	-
	Min RSRP	-140 dBm
	Diversity support (DL)	-
	Diversity support (UL)	-
	DL traffic load	100%
	Max DL traffic load	100%
	UL traffic load	100%
	Max UL traffic load	100%
UL noise rise (intra-technology)	6 dB	
Neighbours	Max number of neighbours (intra-technology)	16
	Max number of neighbours (inter-technology)	16

Tabla 6. Parámetros de la Plantilla LTE.

A continuación se han definido los *clutter clases* que tendremos en nuestro mapa. El *clutter classes* describe el uso que se hace de la superficie de interés. Cada píxel del archivo *clutter class* que hemos importado contiene un código (de un máximo de 256 posibles) que corresponde con el tipo de *clutter* que tiene, o la forma en la que hacemos uso del terreno en

ese píxel en particular. La descripción de todos los píxeles del mapa lo podemos encontrar en la Figura 15:

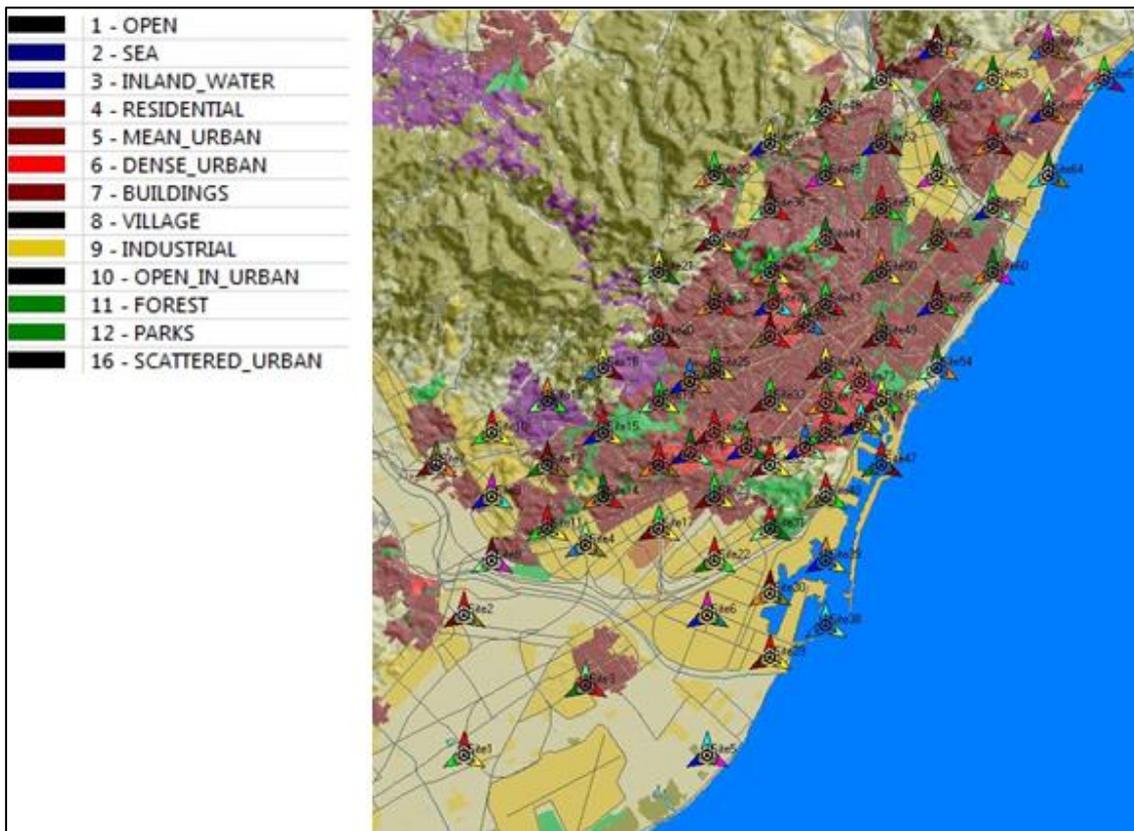


Figura 15. Definición del *Clutter Classes*.

Posteriormente se han importado tanto los *Sites*, *Transmitters* y *Cells* con las características especificadas en la plantilla. Estos datos se han importado de trabajos previos del grupo de investigación del departamento. Posteriormente se ha definido una zona de cálculo (*Computation Zone*) abarcando la zona de interés para reducir los cálculos y el tiempo de simulación.

La *Computation Zone* se utiliza para definir donde lleva a cabo ATOLL sus cálculos. Cuando hacemos un balance de enlace o estudiamos una interferencia, ATOLL hace el cálculo en todos los enlaces que están activados dentro de la *Computation Zone*.

Cuando trabajamos con una red demasiado extensa, la *Computation Zone* nos permite restringir la zona de cálculo a una zona concreta de la red con la que estamos trabajando. Esto nos permite reducir el número de radioenlaces con los que trabajar, con esto ATOLL puede administrar mejor los recursos que utiliza el ordenador y el tiempo de cálculo necesario para los cálculos.

Si no hay *Computation Zone* definida, ATOLL hace el cálculo de todos los radioenlaces que están activos para toda la zona geográfica de cálculo.

Tendremos en cuenta la *Computation Zone* tanto si está o no visible. En otras palabras, si hemos dibujado una *Computation Zone*, lo tendremos en cuenta estando o no visible en la carpeta *Zones* de la pestaña *Geo*. Tendremos que eliminar la *Computation Zone* si queremos definir otras zonas de cálculo.

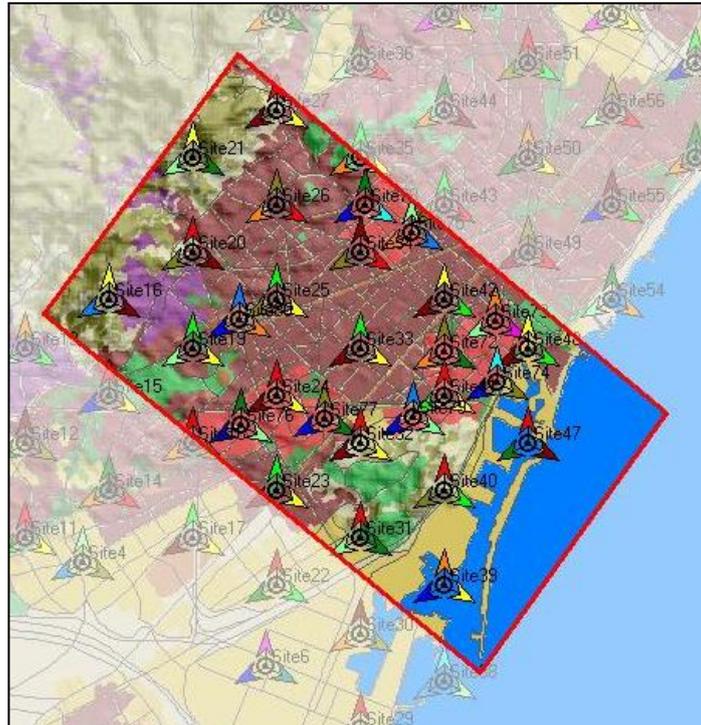


Figura 16. Computation Zone de la red LTE.

4.2.2. Configuración del modelo de propagación

Se ha escogido un modelo de propagación *Cost-Hata* por defecto con una resolución de 20m. La configuración del modelo de propagación nos dará la manera en la que se comporta dependiendo de la zona en la que estemos situados. Para una mejor adaptación al entorno, se asociarán las formulas del modelo a las distintas clases de *clutter* que tenemos. A continuación se añade en la siguiente tabla la configuración del modelo de propagación.

Formulas assigned to clutter classes		
1.	Open	Rural (open area)
2.	Sea	Rural (open area)
3.	Inland water	Rural (open area)
4.	Residential	Metropolitan center
5.	Mean urban	Metropolitan center
6.	Dense urban	Metropolitan center
7.	Buildings	Metropolitan center
8.	Village	Metropolitan center
9.	Industrial	Metropolitan center
10.	Open in urban	Rural (quasi-open)
11.	Forest	Rural (quasi-open)
12.	Parks	Rural (quasi-open)
13.	Scattered urban	Metropolitan center

Tabla 7. Parámetros del modelo de propagación *Cost-Hata*.

4.2.3. Configuración de servicios, terminales, movilidades y perfiles de usuario

En el proceso inicial de la configuración de la red debemos fijar los parámetros relativos a los servicios disponibles, la movilidad de los usuarios y las características de los terminales. Se ha cambiado algunos valores que venían por defecto, tales como la demanda de *throughput*, ya que estaban definidos a cero. En el caso que nos ocupa, al definir los servicios, se han cambiado los valores que estaban por defecto con el fin de acercarnos a un modelo más realista de red, que contemple el uso del terminal para la transmisión de datos además de para el servicio de voz. Las diferentes características de los servicios utilizados en la red LTE están reunidas en la siguiente tabla:

	FTP Download	Web Browsing	Video Conferencing	VoIP
Type	Data	Data	Voice	Voice
Priority	0	1	2	3
Activity factor (DL)	1	1	0,5	0,6
Activity factor (UL)	1	1	0,5	0,6
Average requested throughput (DL)	256 kbps	64 kbps	64 kbps	12,2 kbps
Average requested throughput (UL)	32 kbps	32 kbps	64 kbps	12,2 kbps
Highest bearer (DL)	15	15	15	15
Highest bearer (UL)	15	15	15	15
Lowest bearer (DL)	1	1	1	1
Lowest bearer (UL)	1	1	1	1
Max throughput demand (DL)	1024 kbps	256 kbps	128 kbps	24,4 kbps
Max throughput demand (UL)	128 kbps	128 kbps	128 kbps	24,4 kbps
Min throughput demand (DL)	10 kbps	64 kbps	64 kbps	12,2 kbps
Min throughput demand (UL)	10 kbps	32 kbps	64 kbps	12,2 kbps
Scaling factor	95 %	95 %	95 %	95 %
Offset	0 kbps	0 kbps	0 kbps	0 kbps
Body loss	0 dB	0 dB	0 dB	3 dB

Tabla 8. Parámetros de los servicios de la red LTE.

Se ha fijado en la altura del receptor a la de 1,5 metros. Las antenas que utilizan los terminales móviles se han definido como isotrópicas ideales con diagramas esféricos de propagación en los planos horizontal y vertical.

A continuación se van a especificar las características de los terminales móviles utilizados en la red LTE.

	Mobile Terminal	MIMO Terminal
Min power	-40 dBm	-40 dBm
Max power	23 dBm	23 dBm
Noise figure	8 dB	8 dB
Losses	0 dB	0 dB
LTE equipment	Default UE equipment	Default UE equipment
UE category	UE Category 5	UE Category 5
Antenna model	Omni 11dBi 0Tilt 2100MHz	Omni 11dBi 0Tilt 2100MHz
Diversity support	None	MIMO
MIMO Number of transmission antenna ports	-	2
MIMO Number of reception antenna ports	-	2

Tabla 9. Características de los terminales de la red LTE.

Los perfiles de usuario y los tipos de movilidad se mantuvieron con los valores definidos por defecto en ATOLL para las siguientes predicciones y simulaciones.

Ahora vamos a ver las características de los tipos de movilidad y perfiles de usuario respectivamente:

Movilidad:

Mobility Type	Speed
50 km/h	50 km/h
90 km/h	90 km/h
Fixed	0 km/h
Pedestrian	3 km/h

Tabla 10. Tipos de movilidad de usuarios de la red LTE.

Perfiles de usuario:

	Service	Terminal	Calls/hour	Duration (sec.)	UL Volume (KBytes)	DL Volume (KBytes)
Business User	FTP Download	MIMO Terminal	0,01		2000	15000
	Video Conferencing	MIMO Terminal	0,01	600		
	VoIP	Mobile Terminal	0,2	240		
	Web Browsing	MIMO Terminal	0,1		700	4500
Standard User	Web Browsing	MIMO Terminal	0,1		700	4500
	VoIP	Mobile Terminal	0,2	240		

Tabla 11. Características de los perfiles de usuario en la red LTE.

4.2.4. Estudios de cobertura por nivel de señal

Una vez que se han definido los parámetros de los servicios, movilidad, terminales y las características de los diferentes perfiles de usuarios, se ha realizado un estudio de cobertura por nivel de señal del tipo *Coverage by Signal Level* para una sensibilidad de -124 dBm. Tal y se

puede comprobar en la Figura 17, las estaciones base desplegadas dan un servicio a la zona de interés por encima de la sensibilidad definida.

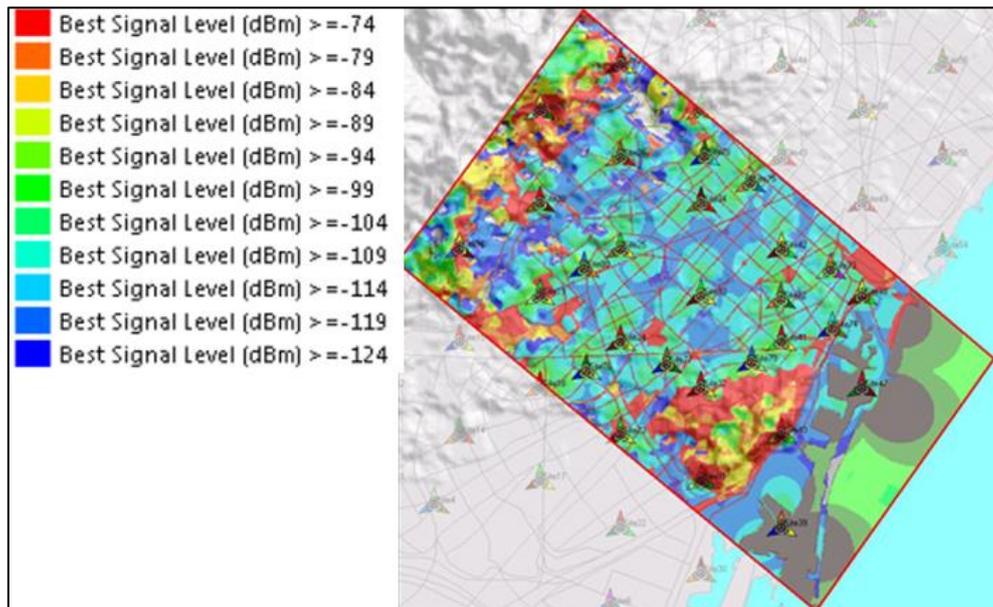


Figura 17. Resultado de la predicción *Coverage by Signal Level*.

En la Figura 17 se puede ver la predicción sobre el nivel de señal en la red. Todos los píxeles del mapa son tratados como usuarios potenciales. Se ha realizado el estudio de nivel de cobertura para cada píxel, en el caso que existan píxeles con un color diferente de los incluidos en la leyenda quiere decir que en ese punto no tendremos cobertura. Si atendemos a la distribución del modelo de propagación, podemos ver que en las zonas urbanas (*Metropolitan Center*) tendremos menor nivel de cobertura en comparación con las zonas rurales (*Rural*).

4.3. Optimización de la red LTE

Para optimizar una red ATOLL dispone de varios mecanismos: la creación de un mapa de tráfico, la asignación de vecinos, planificación de frecuencias y por último la asignación de los *Physical Cell IDs*.

4.3.1. Creación de mapa de tráfico

Para determinar las condiciones de carga de tráfico por celda, se ha realizado una simulación de Monte Carlo. A la hora de crear un mapa de tráfico se busca cuántos usuarios se generan en cada zona del mapa y de qué perfil vendrán determinados, según el mapa de tráfico. Se puede definir tres tipos de mapa de tráfico, los mapas del tipo *Sector Traffic* se construyen a partir de datos reales de carga por sector de la red, de los que puede disponer el propio operador. Por otro lado, los mapas del tipo *User Density* se construyen a partir de densidades de población en la zona a estudiar. Finalmente, los mapas del tipo *User Profile*, que se basan en datos estadísticos de perfiles de usuario habituales en un determinado entorno.

En este caso se ha recuperado un mapa de tráfico utilizado en otro proyecto final de carrera. Este mapa de tráfico, perteneciente al último caso, fue creado acorde a los datos reales de la ciudad de Barcelona con los perfiles urbanos definidos por ATOLL. Las densidades de usuarios de cada perfil (*Environment*) fueron modificados acorde con los objetivos de cada simulación.

La Tabla 12 reúne las características originales de los *Enviroments*:

	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
User Profile	Business	Standard	Business	Standard	Business	Standard
Mobility	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian
Density (subscribes/km ²)	800	800	400	400	200	20

Tabla 12. Parámetros de los entornos de la red LTE.

Se puede observar que la tabla anterior reúne solamente usuarios de movilidad tipo *Pedestrian* para cada entorno. De igual manera, los umbrales de selección de diferentes servicios portadores radio (*Bearer Selection Thresholds*) están definidos en ATOLL con los mismos valores para los cuatro tipos de movilidad. En un entorno real, los umbrales de selección de los *Radio Bearers* sí que dependen de la movilidad del usuario, siendo más favorable a usuarios que estén fijos a usuarios que estén en movimiento. Sin embargo, en este proyecto final de carrera no se han modificado dichos umbrales, ya que se ha considerado que al centrarse en un entorno urbano, se ha supuesto que todos los terminales únicamente disponían de la movilidad tipo *Pederestian*. Pero aun así hay que destacar que ATOLL dispone de la posibilidad de modificar los umbrales de selección de *Radio Bearers* para cada tipo de movilidad de forma independiente, así como añadir diferentes tipos de usuarios con distintas movilidads dentro de cada entorno definido.

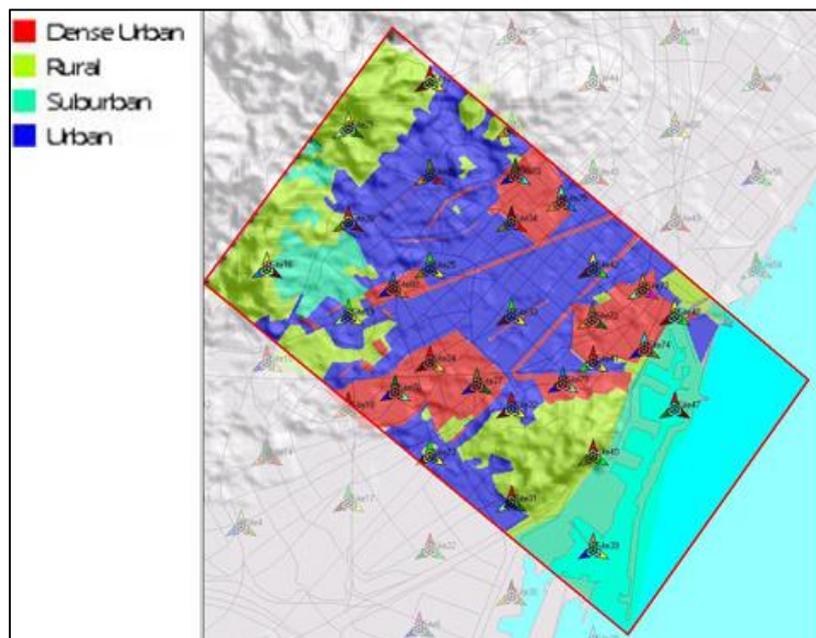


Figura 18. Mapa de tráfico para la ciudad de Barcelona según los *Enviroments*.

En este mapa podemos comprobar la diferencia de entornos en los que trabajamos. La diferencia de color reside en el cambio de clutter, es decir, de zona de trabajo, donde vamos a tener unas condiciones de carga de tráfico, función que depende casi exclusivamente de la densidad de población, que como ya hemos visto antes varía según el entorno.

En la Figura 19 se muestran los *Bearers Selection Thresholds* definidos por defecto en ATOLL y utilizados para todas las simulaciones y predicciones descritas más adelante.

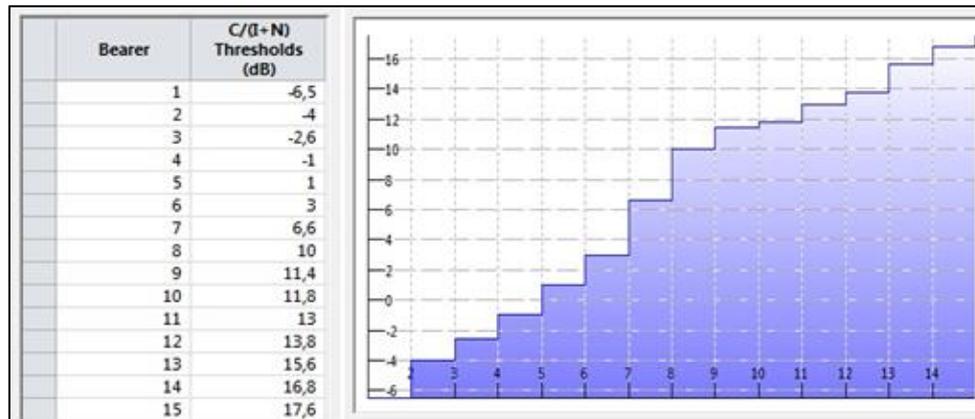


Figura 19. *Bearers Selection Thresholds* para todas las movilidades de la red LTE.

La siguiente tabla muestra las características de los distintos *Radio Bearers*.

Radio Bearer Index	Name	Modulation	Channel coding rate	Bearer efficiency (bits/symbol)
1	QPSK 1/12	QPSK	0,0761719	0,1523
2	QPSK 1/9	QPSK	0,117188	0,2344
3	QPSK 1/6	QPSK	0,188477	0,377
4	QPSK 1/3	QPSK	0,300781	0,6016
5	QPSK 1/2	QPSK	0,438477	0,877
6	QPSK 3/5	QPSK	0,587891	1,1758
7	16 QAM 1/3	16 QAM	0,369141	1,4766
8	16 QAM 1/2	16 QAM	0,478516	1,9141
9	16 QAM 3/5	16 QAM	0,601563	2,4063
10	64 QAM 1/2	64 QAM	0,455078	2,7305
11	64 QAM 1/2	64 QAM	0,553711	3,3223
12	64 QAM 3/5	64 QAM	0,650391	3,9023
13	64 QAM 3/4	64 QAM	0,753906	4,5234
14	64 QAM 5/6	64 QAM	0,852539	5,1152
15	64 QAM 11/12	64 QAM	0,925781	5,5547

Tabla 13. Características de los *Radio Bearers* en la red LTE.

En la tabla anterior se pueden apreciar las diferentes características de los *Radio Bearers* de la red. Se comprueba que está definido desde el Bearer 1, que es el de menor calidad, al Bearer 15, que ofrece la máxima eficiencia que se puede conseguir. Observando las columnas de *Channel Coding Rate* o *Channel Efficiency* se comprueba que a medida que se sube el nivel del Bearer asignado se aumenta la eficiencia a nivel de bit transmitido.

4.3.2. Asignación de vecinos

Conjuntamente con el mapa de tráfico, se ha realizado una asignación de vecinos estableciendo un número máximo de 16 vecinos para la misma tecnología (*Intra-technology*), con una distancia máxima de 4000m. Se ha elegido un algoritmo que realizara los cálculos considerando *shadowing* para una probabilidad de cobertura del 85% en el borde de la celda, con unos márgenes de histéresis (*RSRP Margin*) de 5dB entre la zona de cobertura de la celda servidora y las celdas vecinas y un porcentaje del 10% de solapamiento (*% Min Covered Area*) entre la celda servidora y vecina para ser consideradas vecinas.

4.3.3. Planificación de frecuencias

Conjuntamente con la planificación de vecinos se va a hacer también una planificación automática de frecuencias para asignar los canales 0, 1, 2 de los posibles 12 canales de 5MHz de la banda utilizada (2110 FDD – 5 MHz (E-UTRAN Band 1)). Con esta planificación se reducirán las interferencias intercelulares, pero se producirá un aumento del espectro utilizado por el operador, que ha pasado de 5 a 15 MHz.

4.3.4. Planificación del *Physical Cell ID*

Se ha realizado una asignación automática del *Physical Cell ID* para cada celda tomando en consideración los vecinos definidos anteriormente y permitiendo asignar los ID dentro del dominio [0,503]. Este dominio es un entero que está definido dentro de las especificaciones del 3GPP. Se usa para que el terminal sepa identificar cada celda, de forma que sepa interpretar las señales pseudo-aleatorias de referencias transmitidas por la base y que son usadas por el terminal para determinar la calidad del canal recibido.

5. *Análisis*

Después de realizar el aprendizaje de ATOLL y conocer sus características más importantes, ahora el lector estará familiarizado con las herramientas necesarias para llevar a cabo el objetivo de este proyecto final de carrera. Dicho objetivo es el de realizar un plan nominal para un sistema LTE con ATOLL. Como ya se ha mencionado anteriormente al plantear el problema de la realización de un plan nominal, hay que tener en cuenta que es un escenario ideal, y en una situación real pueden aparecer una serie de limitaciones y restricciones que nos desvíen de lo previsto en la situación ideal. Es en este punto donde la planificación se convierte en un proceso iterativo donde los requisitos y objetivos han de ser mantenidos.

Aunque previamente ya se haya realizado el diseño de una red con el sistema LTE para la ciudad de Barcelona, el objetivo de dicha red era solo para ilustrar al lector del principio de operación de ATOLL. En este capítulo se va a realizar una nueva planificación de la red con unas características idénticas al estándar de comunicaciones LTE requerido para operar. Una vez planificada la red, se realizará una primera aproximación de los parámetros fundamentales de la red, de la que se obtendrá una primera aproximación del correcto funcionamiento de la red. Esta aproximación se realizará sin aplicar la tecnología MIMO a las antenas. Con esta aproximación simplemente se desea realizar una primera calibración de los parámetros de la red, de forma que se puedan optimizar rápidamente. Una vez realizada esta optimización de la red, se cambiará la característica de las antenas referida el MIMO para aplicarle la técnica de multiplexación de antenas. En ese momento se realizarán las simulaciones y predicciones correspondientes y pasaremos a analizar los resultados considerando la multiplexación.

5.1. **Planificación de la red**

La planificación de la red es aquel proceso mediante el cual el operador dimensiona la red celular determinando el número de celdas necesario, el reparto de los radiocanales disponibles entre las mismas y los parámetros de transmisión de cada una.

5.1.1. **Definición estándar LTE**

El primer paso para una correcta planificación de red es la elección del estándar de comunicaciones. En este caso, una característica a definir en LTE es la frecuencia a la cual opera nuestro sistema. La banda de frecuencia en la que operaremos será la siguiente:

Banda 7 – 2.6 GHz con un ancho de banda de 10 MHz

Esta banda frecuencial ha sido la escogida por diferentes operadores para que el sistema LTE opere en entornos urbanos y suburbanos a nivel europeo, con lo que será la que se configurará a la hora de diseñar nuestro sistema [19].

A continuación se van a exponer, como ya se hizo en el capítulo anterior, los diferentes parámetros definidos para caracterizar la red. La mayoría serán equivalentes, pero a efectos de una nueva planificación de red y para ajustar el modelo a lo especificado por el 3GPP, se han realizado dos cambios respecto a la definición de la plantilla anterior. Se ha variado el modelo de propagación a *Standard Propagation Model* y se ha cambiado la banda de frecuencia (hemos pasado de la Banda 1 a la Banda 7). Estos cambios se justificarán más adelante.

	Parámetro	Valor
General	Sectors	3
	Hexagon radius	550 m
	1st sector azimuth	0°
	Height/ground	30 m
	Mechanical downtilt	0°
	Additional electrical downtilt	0°
	Main antenna model	65deg 18dBi 4Tilt 2100MHZ
	Number of antenna ports (transmission)	1
	Number of antenna ports (reception)	1
	Main propagation model	Standard Propagation Model
	Main radius	4000 m
	Main resolution	20 m
Transmitter	TMA	Default TMA Equipment
	Feeder	½" at 2100MHz
	Transmitter equipment	Default e-nodeB Equipment
	Feeder length (transmission)	5 m
	Feeder length (reception)	5 m
	Miscellaneous losses (transmission)	0 dB
	Miscellaneous losses (reception)	0 dB
	Total losses (transmission)	1,51 dB
	Total losses (reception)	-2,09 dB
	Noise figure	5 dB
LTE	Max power	43 dB
	SS, PBCH, PDCCH, PDSCH offsets	0 dB
	Frequency band	2600 FDD – 10 MHz (E-UTRAN Band 7)
	Reception equipment	Default Cell Equipment
	Scheduler	Round Robin
	Max number of users	-
	Min RSRP	-140 dBm
	Diversity support (DL)	-
	Diversity support (UL)	-
	DL traffic load	100%
	Max DL traffic load	100%
	UL traffic load	100%
	Max UL traffic load	100%
	UL noise rise (intra-technology)	6 dB
Neighbours	Max number of neighbours (intra-technology)	16
	Max number of neighbours (inter-technology)	16

Tabla 14. Plantilla del sistema LTE.

5.1.1.1. Importación de la zona de trabajo

Después de definir el estándar de comunicaciones que vamos a utilizar, pasamos a importar al programa los ficheros de la zona de trabajo. Como ya hemos comentado, el

proyecto actual está centrado en la zona urbana de Barcelona, y los mapas importados para definir las características de la ciudad en ATOLL son los siguientes: *Height* (altimetría), *Image* (ortofoto), *Clutter* (clases de clutter) y *Vector* (vectorial).

El siguiente paso es el de asignar la característica de *clutter* a las diferentes zonas de la ciudad. Esta definición es necesaria porque cuando veamos el modelo de propagación nos encontraremos que depende de la definición de las diferentes zonas del *Clutter Classes*.

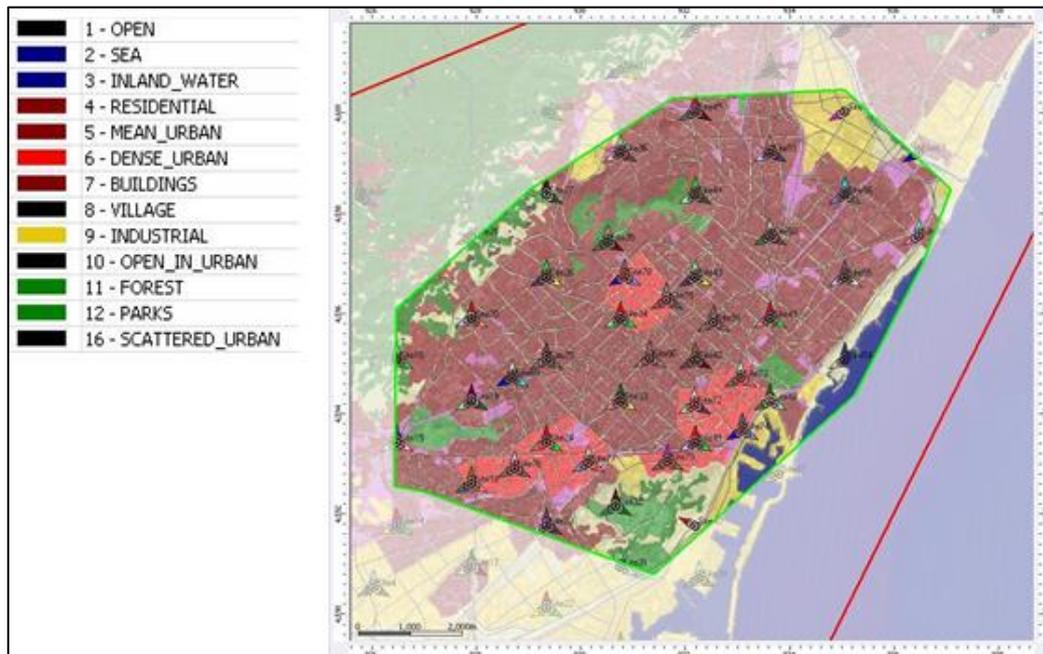


Figura 20. Clasificación de los diferentes *clutter* del mapa de trabajo.

De forma análoga al capítulo de anterior, se puede comprobar en la leyenda la asignación de los diferentes *clutters* del mapa. Más adelante, cuando se vea la configuración del modelo de propagación se podrá comprobar el uso que se hace de las diferentes asignaciones de este *clutter*.

Posteriormente se ha importado desde un archivo de los diferentes *Sites*, *Transmitters* y *Cells*.

5.1.1.2. Definición de la *Computation/Focus Zone*

También de forma análoga al caso anterior, hemos definido una *Computation Zone* abarcando la zona de interés de trabajo.

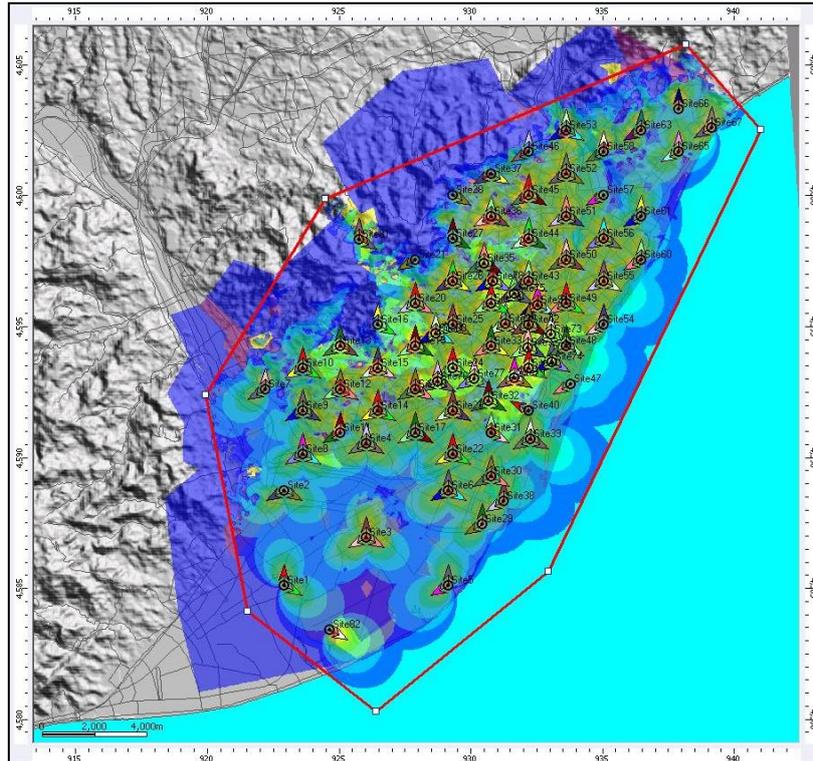


Figura 21. Computation Zone de la red LTE.

Divergiendo del caso anterior definiremos una *Focus Zone* (recuadro verde de la Figura 22). Una *Focus Zone* define un área donde se hacen los informes de las simulaciones y donde se pintan dichos cálculos. Es importante diferenciar entre la *Focus Zone* y la *Computation Zone*. La *Computation Zone* define un área donde ATOLL calcula predicciones de cobertura, simulaciones de Monte Carlo, etc., mientras que la *Focus Zone* es el área a tener en consideración a la hora de generar informes y resultados. Cuando creamos una predicción de cobertura, por ejemplo, da los resultados de una manera general y también aislada para *Focus Zone* definida [18].

En este caso vamos a definir la *Focus Zone* en el centro de la ciudad, que es donde más interesa ver los resultados, ya que es la zona que va a soportar más tráfico y es donde más interesa evaluar el rendimiento del sistema.

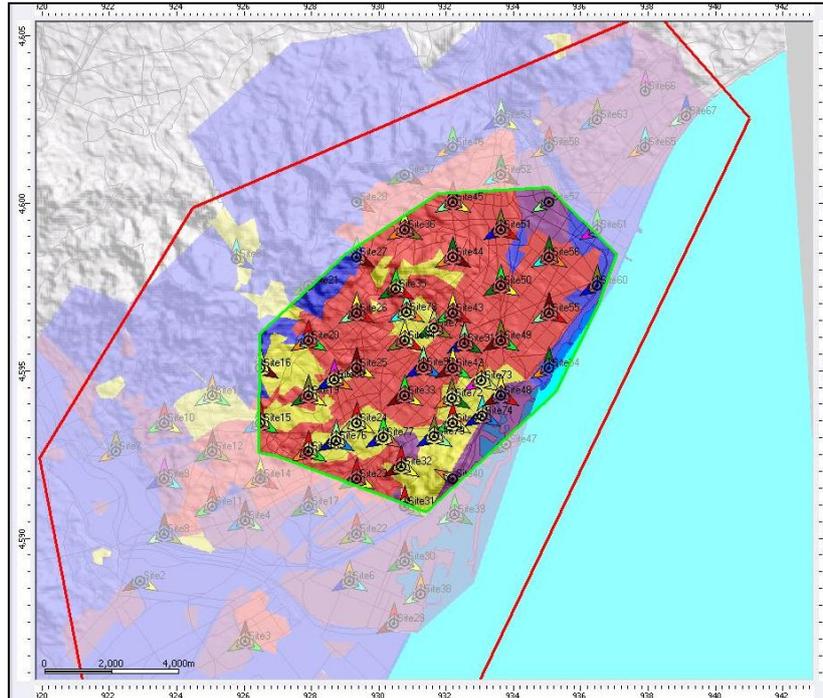


Figura 22. Focus Zone de la red LTE.

5.1.2. Configuración del modelo de propagación

Para este caso, se ha escogido el modelo de propagación estándar (*Standard Propagation Model - SPM*). El modelo de propagación estándar es el propuesto por el 3GPP para zonas urbanas [20]. Este modelo es una derivación del modelo de propagación Cost-Hata, utilizado en el capítulo anterior. Como veremos a continuación en las formulas, este modelo tiene en cuenta la geografía del terreno, mecanismos de difracción, diferentes clases de *clutter* y la altura de las antenas para calcular las pérdidas de propagación.

$$P_R = P_{Tx} - \left(\frac{K_1 + K_2 \times \text{Log}(d) + K_3 \times \text{Log}(H_{Tx_{eff}}) + K_4 \times \text{DiffractionLoss} + K_5 \times \text{Log}(d) \times \text{Log}(H_{Tx_{eff}}) + K_6 \times H_{Rx_{eff}} + K_7 \times \text{Log}(H_{Rx_{eff}}) + K_{clutter} \times f(clutter) + K_{hill, LOS}}{1} \right)$$

Figura 23. Configuración del modelo de propagación SPM.

Fuente: extraído de [18].

Dónde:

- P_{Rx} Potencia recibida
- P_{Tx} Potencia transmitida
- K_1 Constante de offset (dB)
- K_2 Factor de multiplicación para log (d)
- d Distancia entre el transmisor y el receptor (m)
- K_3 Factor de multiplicación para log ($H_{Tx_{eff}}$)
- $H_{Tx_{eff}}$ Altura efectiva de la antena transmisora (m)
- K_4 Factor de multiplicación para el cálculo de la difracción, $K_4 > 0$
- *DiffractionLoss* Pérdidas de difracción debido a obstrucciones en el camino (dB)
- K_5 Factor de multiplicación para log(d) x log($H_{Tx_{eff}}$)
- K_6 Factor de multiplicación para $H_{Rx_{eff}}$

- K_7 Factor de multiplicación para $\log(H_{R_{\text{xeff}}})$
- $H_{R_{\text{xeff}}}$ Altura de la antena móvil (m)
- K_{clutter} Factor de multiplicación para $f(\text{clutter})$
- $f(\text{clutter})$ Promedio ponderado de las pérdidas según el *clutter*
- $K_{\text{hill, LOS}}$ factor de corrección para regiones montañosas (=0 en NLOS)

5.1.3. Configuración de servicios, movilidad, terminales y perfiles de usuario

Análogamente al caso anterior, antes de poder realizar cualquier tipo de simulación o de predicción, tenemos que fijar los parámetros de los servicios disponibles, la movilidad de los usuarios en función de las zonas en las que se desplazan y la las características de los diferentes terminales.

Como en este caso los valores a definir son los mismos que en el capítulo anterior, se han dejado referenciados. La información referente a la configuración de los diferentes servicios, los tipos de terminales, movilidad, los diferentes perfiles de usuario y el umbral de selección de portadores se puede encontrar en el apartado 4.2.3.

5.2. Análisis de Cobertura sin mapa de tráfico

Una vez que se han realizado las configuraciones iniciales para simular un entorno de operación del estándar LTE, procedemos a realizar las predicciones para ver el impacto que supondría la implantación de este sistema en un entorno urbano. Primero se realizarán predicciones sin tener en cuenta el mapa de tráfico, para obtener una primera calibración de la red. Más tarde se realizarán predicciones teniendo en cuenta el mapa de tráfico. En función de los resultados obtenidos se procederá a la optimización de la red.

5.2.1. Cobertura por transmisor

La primera predicción que se realiza es la de *Coverage by Transmitter*. En la Figura 24 se puede ver la realización de dicha simulación. En ella podemos apreciar el mapa de la ciudad de Barcelona con las estaciones bases correspondientes. Como hemos indicado en el capítulo anterior, cualquier predicción analiza, píxel por píxel del mapa. En este caso, la predicción *Coverage by Transmitter*, analiza qué transmisor es el más adecuado

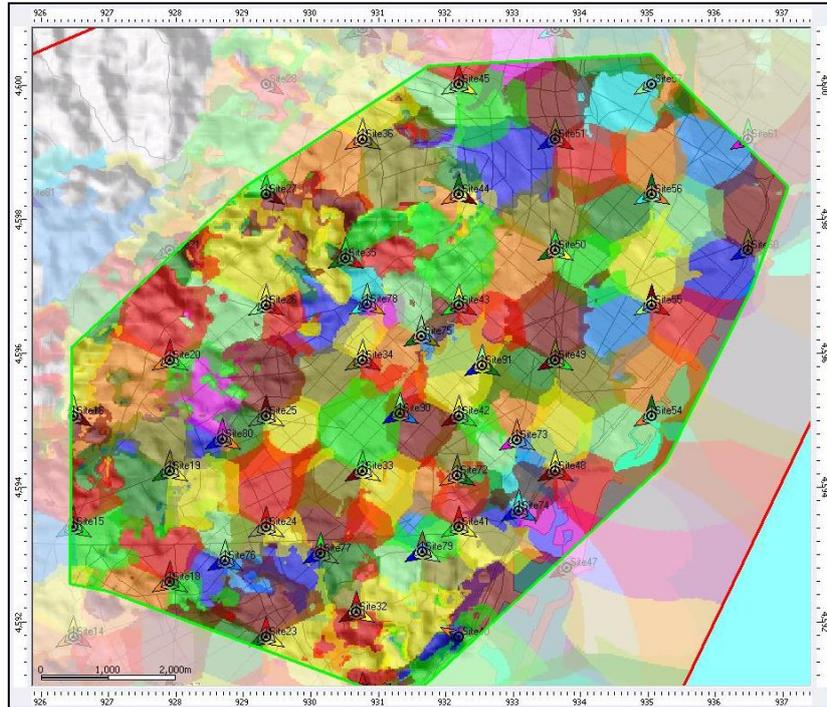


Figura 24. Resultado de la predicción *Coverage by Transmitter*.

Esta primera predicción es necesaria ya que queremos garantizar que para toda la ciudad, en especial para la *Focus Zone*, no exista ningún punto en el que los transmisores no den cobertura. Tal y como podemos comprobar viendo la imagen de la predicción se darán casos en el que existan puntos donde haya más de un transmisor garantizando una buena calidad de cobertura. Esos puntos podrían ser susceptibles de desconectar algún transmisor, de manera que para asegurarnos se ha realizado la siguiente predicción.

5.2.2. Cobertura por zonas de solapamiento

Visto que hay áreas de la zona de acción en el que vamos a tener varios transmisores dando servicio, una manera de optimizar el esquema anterior es el de ver qué zonas tienen mayor solapamiento. Esto nos podría beneficiar, ya que, en esas zonas en concreto, podríamos desactivar algunos transmisores. Como este proyecto final de carrera está enfocado a dar una visión de operadora a una posible implantación de la tecnología LTE, cuanto mayor sea el ahorro de recursos, mejor.

Para calibrar estas zonas de solapamiento se ha realizado la predicción *Overlapping Zones*. De esta manera podremos calibrar correctamente lo mencionado anteriormente y podremos hacer una primera optimización de la red.

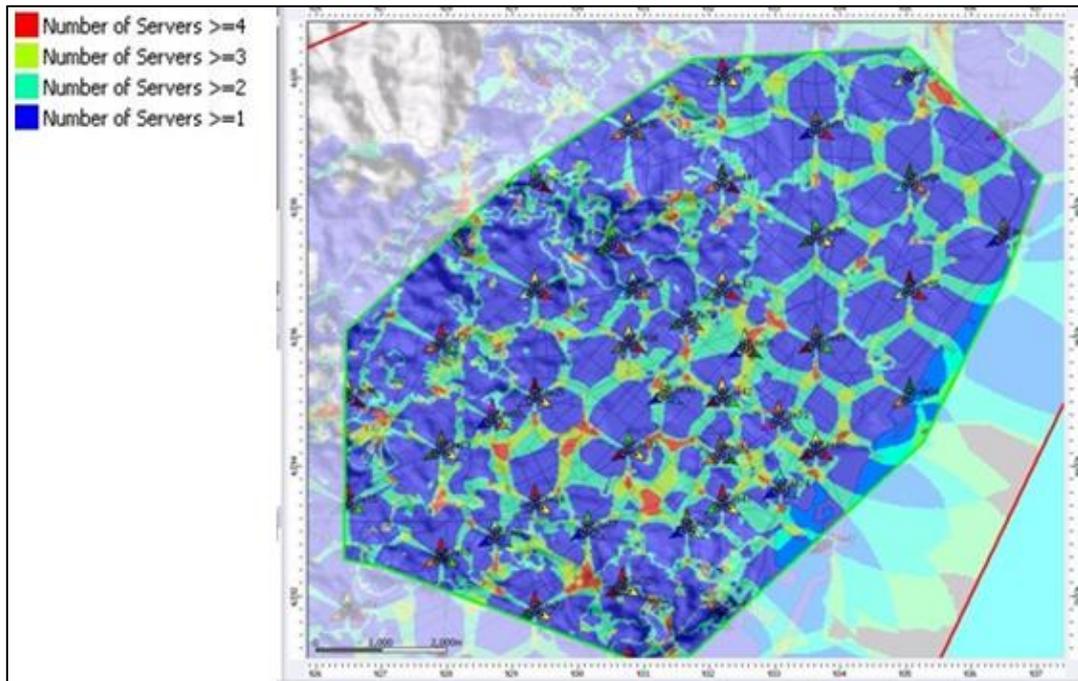


Figura 25. Resultado de la predicción *Coverage by Overlapping Zones*.

Como se puede apreciar en la leyenda de la predicción, las zonas de color azul son las que da servicio un transmisor. Para este caso se ha de garantizar que se da servicio a todos los píxeles del mapa, para garantizar que no existen vacíos y que se da cobertura a todos los usuarios. Por otra parte, para una correcta optimización del despliegue de la red deberíamos señalar los puntos en los que se produce más de uno o dos solapamientos, que son los puntos marcados en rojo y verde. Es en estos puntos donde se podría optimizar el sistema desactivando algunos transmisores.

5.2.3. Cobertura por nivel de señal

Una vez que se ha garantizado que se da servicio a todos los posibles usuarios, realizamos la predicción *Coverage by Signal Level*. Esta predicción nos devolverá, para cada píxel del mapa, su nivel de señal, considerando una sensibilidad de -124 dBm.

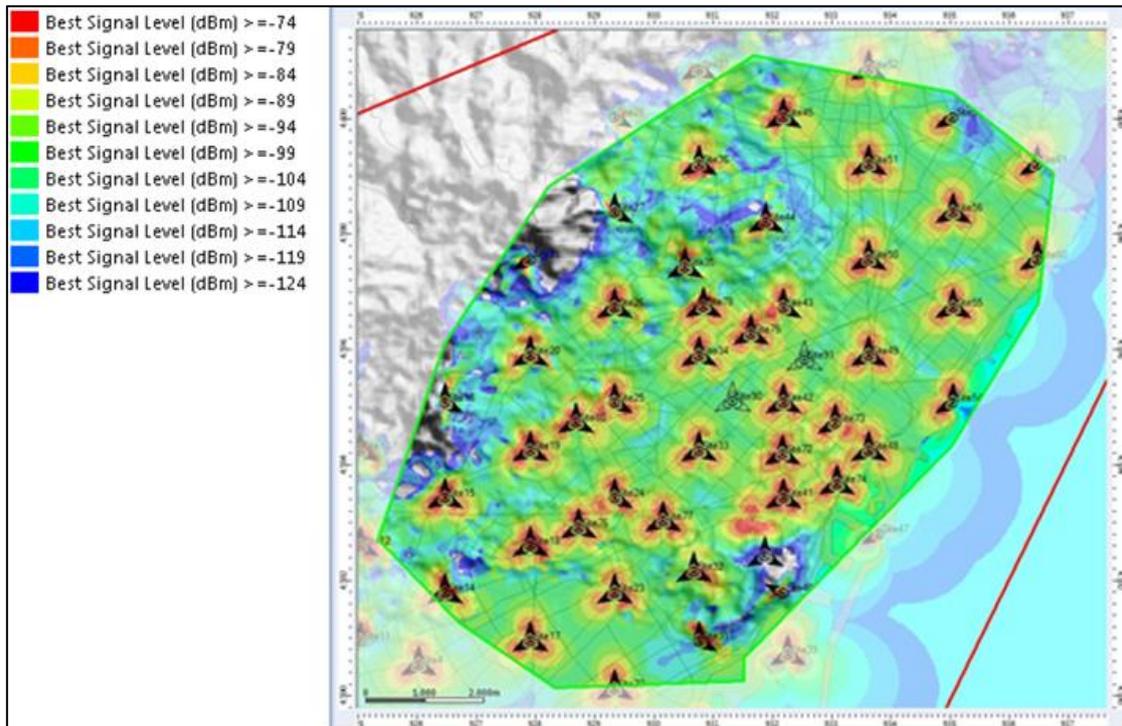


Figura 26. Resultado de la predicción *Coverage by Signal Level*.

En la Figura 26 se puede visualizar el nivel de señal para todos los posibles usuarios. Atendiendo a la leyenda se comprueba que los diferentes usuarios que están a una distancia menor de la antena tendrán mejor nivel de señal. A medida que la distancia crece, el nivel de señal que recibe un usuario va menguando, hasta que en el mapa no sale reflejado ningún color perteneciente a la leyenda, que indica que en esa zona los usuarios no serán capaces de recibir señal. Analizando el mapa de Barcelona, se puede comprobar que estas zonas en las que no se recibe nivel de señal corresponden a zonas donde los accidentes topográficos son exagerados, como es el caso de Montjuic o Vallvidrera.

Como operador, a la hora de diseñar una red, el objetivo fundamental es de proveer de servicio al máximo número de usuarios posibles, garantizando un mínimo de calidad. Es por ello, que una vez realizada la predicción de nivel de cobertura, se procederá más adelante a optimizar dicha red, de forma que quede un diseño lo más eficiente posible.

5.2.4. Optimización sin mapa de tráfico

Una vez se han visto las primeras predicciones se ha detectado la necesidad de proceder con una primera optimización de la red. Esta primera optimización se ha llevado a cabo sin tener en cuenta el mapa de tráfico. Más adelante, con la inclusión del mapa de tráfico y habiendo realizado las predicciones necesarias, se procederá a completar la optimización de la red.

En esta primera iteración de la optimización se va a proceder a desactivar algunos transmisores que resultan redundantes, es decir, que dan servicio a la misma zona y con peor rendimiento que otros más cercanos. A nivel de operadora interesa obtener el mayor rendimiento con el menor coste, de manera que el usuario quede contento de la calidad de servicio por parte del operador que tenga contratado.

Así pues, observando la red y tomando referencia en la predicción de *Overlapping Zones* se puede comprobar qué transmisores ofrecen servicio de forma duplicada para una zona concreta. Asimismo, basándonos en la última predicción calculada, se obtiene una idea de los transmisores redundantes en la red, comprobando si se dan niveles de señal muy altos de forma cercana. Realizando un proceso iterativo al desactivar algunos transmisores y moviendo otros, se ha tomado la decisión de desactivar estos transmisores de la zona de interés:

Site25_3	Site24_3	Site 43_3
Site73_2	Site 41_3	

Al examinar detenidamente los niveles de cobertura obtenidos en la predicción *Coverage by Signal Level* realizada anteriormente se ha llevado a cabo el siguiente procedimiento: mover dos estaciones base para corregir algún desvanecimiento de la señal por culpa de la topografía del terreno.

Las antenas desplazadas por culpa de la topografía son las siguientes: Site 44 y Site 79. La localización de estos *Sites* era la zona alta de Barcelona, en el barrio del Valle Hebrón, donde la topografía del terreno y los edificios existentes provocan múltiples desvanecimientos de la señal. La nueva ubicación para estos *Sites* es la siguiente:

Site44	x: 932,897	y: 4,598,208	z: 77 m.
Site79	x: 931,867	y: 4,592,404	z: 147 m.

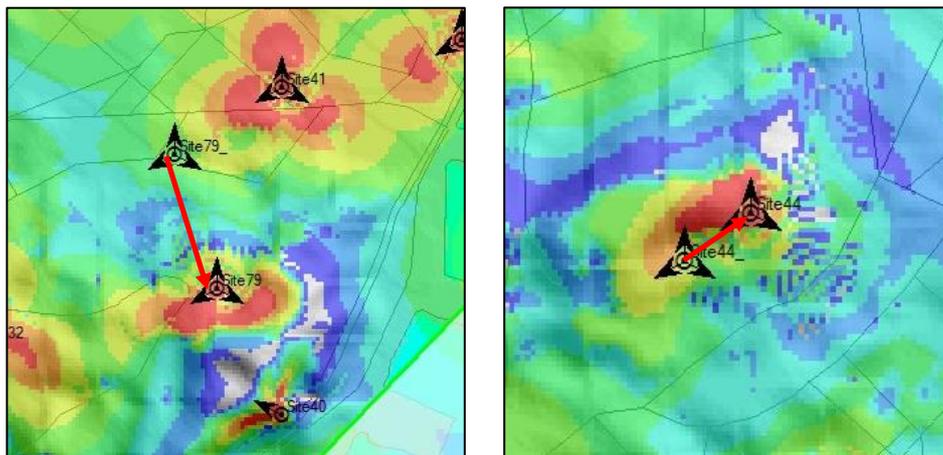


Figura 27. Desplazamientos de los Sites.

Como muestra la Figura 27, las estaciones base que han sido trasladadas corresponden con la zona donde se observaban desvanecimientos, que eran las zonas de Montjuic y Valle Hebrón. En la zona correspondiente al Tibidabo también se ha observado una gran zona donde no hay cobertura. En ella no se ha producido ningún traslado de estación base ya que corresponde a un parque natural. Se ha tomado la decisión, de forma que suponga un ahorro de recursos de no situar ninguna estación base ya que no corresponde con una zona urbana con alta densidad de usuarios. El resultado de estos cambios se puede apreciar en la siguiente imagen:

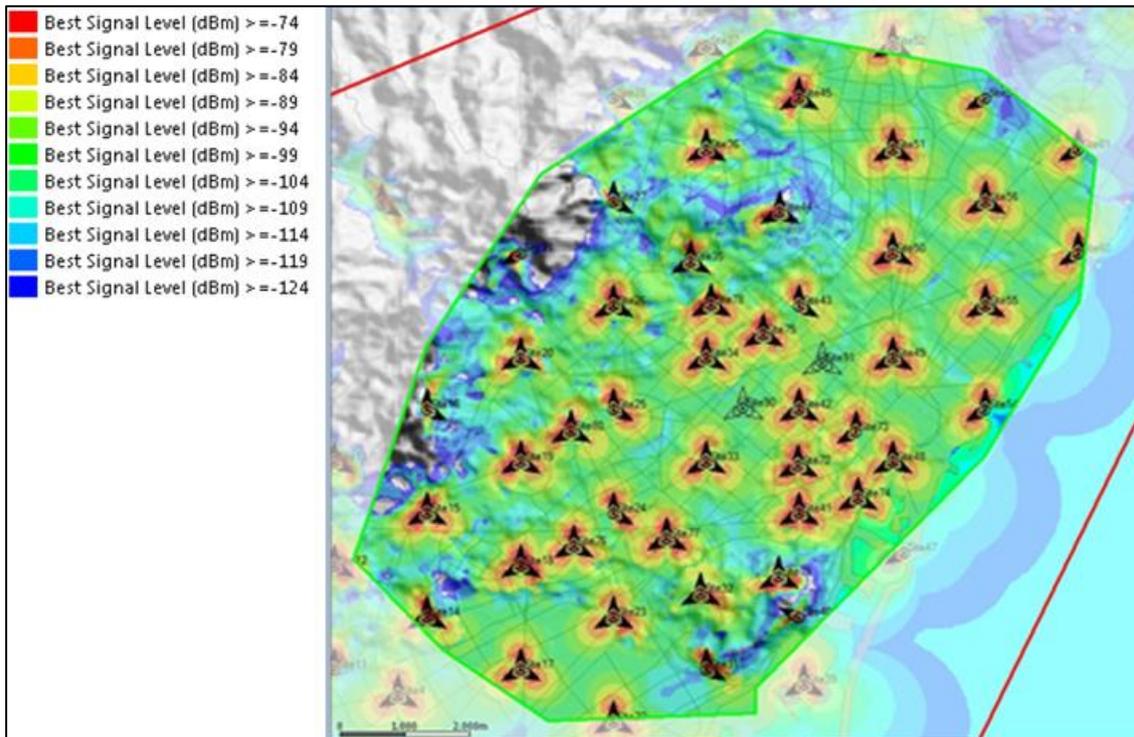


Figura 28. Resultado de la predicción *Coverage by Signal Level* con la red optimizada.

Como se puede apreciar en el mapa la calidad general de la red no varía. Si atendemos con más detalle en las estaciones transmisoras que se han resituado se puede apreciar una mejora en la cobertura. La manera que tenemos de apreciarlo es comprobar que en los resultados de la cobertura, reducimos el número de píxeles que se quedan sin cobertura. Aunque es cierto que no varía de forma sustancial la calidad de la señal en la nueva predicción *Coverage by Signal Level* calculada, estas acciones realizadas (la desactivación de algunos transmisores y la de resituar dos antenas) responden al objetivo de querer dar una cobertura que garantiza una calidad suficiente a todos los usuarios conectados. La comparación de las diferentes predicciones de *Coverage by Signal Level* (en el caso de la red optimizada o no) se comprobará más adelante, una vez realizada la optimización haciendo uso de un mapa de tráfico.

5.3. Análisis de Cobertura considerando el mapa de tráfico

5.3.1. Definición mapa de tráfico

Antes de pasar a examinar el rendimiento del sistema en función de la cantidad de usuarios, se ha añadido un mapa de tráfico, como se ha explicado en el capítulo anterior, que intenta simular un modelo realista de uso de terminales móviles en la ciudad. Este mapa de tráfico se basa en las densidades de usuarios de cada perfil (*Environment*) que fueron modificados de los objetivos de la simulación.

	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
User Profile	Business	Standard	Business	Standard	Business	Standard
Mobility	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian	Pedestrian
Density (subscribers/km ²)	800	800	400	400	200	20

Tabla 15. Parámetros de los entornos de la red LTE.

5.3.2. Simulaciones

Una vez ya hemos desplegado y optimizado la red de forma correcta vamos a realizar unas simulaciones que intenten describir, de forma realista el comportamiento que tiene la red en un momento dado. La forma en la que ATOLL realiza las diferentes simulaciones ya se ha visto en el capítulo anterior. En este apartado se han realizado diversas simulaciones que intentan describir, según los parámetros definidos, el comportamiento de la red. El parámetro principal con el que se han ido variando las diferentes simulaciones es el *Global Scaling Factor*. El *Global Scaling Factor* es un parámetro que nos permite controlar la densidad de usuarios en la red, operando como factor multiplicativo cada vez que se realiza una simulación. Como en este proyecto se va a analizar el comportamiento de la red desplegada según la carga de tráfico, se han realizado las simulaciones correspondientes según el caso en cuestión, se ha variado el *Global Scaling Factor* en 1, 3 y 5. Hay que tener presente que para cada grupo de simulaciones se han realizado diez simulaciones y los datos presentados son la media del grupo completo de simulaciones.

Primero presentaremos una tabla con las estadísticas generales de la red, de la demanda de los usuarios y los resultados obtenidos y más adelante presentaremos otra tabla desglosando todos los servicios, viendo con más detalle el comportamiento de la red para un tráfico dado.

	<i>Scaling Factor 1</i>		<i>Scaling Factor 3</i>		<i>Scaling Factor 6</i>		<i>Scaling Factor 9</i>	
Traffic Load	7,23%		21,72%		43,47%		64,00%	
	Demand	Results	Demand	Results	Demand	Results	Demand	Results
Users	2.406,4	2.406,9	7.195,1	7.188,8	14.382,2	14.367,9	21.641,2	21.616,4
Active DL	1.328,2	1.326,8	3.938,7	3.936,4	7.870,9	7.863,9	11.912,5	11.899,2
Active UL	591,4	590,7	1.774,9	1.773,3	3.577,5	3.574,1	8.303,9	5.298,8
Active DL+UL	335,3	334,9	1.023,8	1.022,6	2.004,7	2.001,7	3.016,0	3.011,9
Inactive	154,5	154,5	457,7	456,5	929,1	928,2	1.408,8	1.406,5
No coverage		0,0		0,5		0,8		1,1
No service		2,5		5,8		13,2		21,0
Scheduler satur.		0,0		0,0		0,0		0,0
Resource satur.		0,0		0,0		0,3		2,7

Tabla 16. Estadísticas de las simulaciones realizadas con diferentes *scaling factors*.

Es interesante apreciar en la Tabla 16 que para cada uno de los grupos de simulaciones la demanda de tráfico para *downlink* es mucho mayor que para *uplink*. Su razón es evidente ya que con los actuales *smartphones* el usuario tiende a navegar por internet para descargar información desde el móvil y eso implica mucho más tráfico de *downlink* que de *uplink*. Esta es la razón por la cual se ha tomado la decisión de escoger como parámetro de relevancia el *Traffic Load (DL)* para la realización de las simulaciones. Variando el *Traffic Load* se ha conseguido simular el estado de la red según la carga de tráfico en un caso real, desde una red

sin mucha carga hasta una red con alta carga de tráfico en el que poder evaluar el estado de la red en casos de alta densidad de usuarios.

Centrándonos en los usuarios podemos comprobar la relación de los diferentes grupos de simulaciones, variando el *scaling factor*. Lo que se quiere conseguir con esta estructura de simulaciones es comprobar el rendimiento de la red cuando la densidad de usuarios es baja y cuando la densidad de usuarios comienza a crecer. En este proyecto se ha considerado variar el *scaling factor* de la forma señalada en la tabla, consiguiendo el *Traffic Load* señalado. Es evidente que el mayor número de usuarios lo encontraremos en aquellas zonas que hayamos definido como *Mean Urban* dentro de la *Focus Zone*.

Para comprobar la relación entre la demanda por parte de los usuarios acudimos a la Tabla 16 donde nos encontramos con los siguientes resultados:

- Para el caso de *scaling factor* igual a uno los resultados corresponden prácticamente con la demanda de los usuarios. Existe un 2,5 de usuarios inactivos por encontrarse en zona en la que no hay servicio. Es decir, todos aquellos usuarios que quieran conectarse para cualquier servicio lo harán sin problemas.
- Para el caso de *scaling factor* igual a tres la proporción de demanda es igual que el caso anterior, salvo que en este caso ya comenzamos a perder usuarios por culpa del tráfico, aunque en comparación con los conectados sus números son irrelevantes. También se puede comprobar que comienza a perder cobertura por la carga de usuarios en la celda, hecho que agravará con las posteriores simulaciones. En este caso perderemos a más usuarios por falta de servicio que por la cobertura, aunque ya se empieza a notar su efecto.
- El siguiente caso es el del *scaling factor* igual a 6 que corresponde con un *Traffic Load* en la celda del 43,47%. En este caso ya corresponde con una alta densidad de usuarios en las celdas, sobre todo las correspondientes a las zonas *Dense Urban*. Aunque eso ocurra, se puede observar en la tabla anterior que la red diseñada soporta de forma correcta esa densidad de tráfico. Es uno de los puntos que es necesario comprobar en este proyecto, que a una determinada densidad de usuarios, intentando simular un caso real, la red ofrece un correcto rendimiento. En este caso se observa un crecimiento de los usuarios que no tienen servicio o que les falta cobertura, pero se puede comprobar la proporcionalidad entre los dos casos anteriores, por lo que se concluye que era un resultado esperado. Es más interesante señalar el dato de que ya comienza a aparecer saturación por falta de recursos en la red, como se puede apreciar.
- Para finalizar, en el caso de *scaling factor* igual a 9, que es el caso en el que existirán más usuarios. Se ha realizado esta simulación con el propósito de comprobar el rendimiento de la red en el caso de que existiera una alta densidad de tráfico. El resultado es interesante en el punto de observación de las zonas *Dense Urban* correspondientes al centro de Barcelona. Observando los resultados se puede comprobar que el diseño es óptimo para soportar una alta densidad de usuarios, aunque comienza a existir saturación en la red ya que hay un 64% de *Traffic Load* en DL. En esta simulación la causa principal de que los usuarios no se conecten a la red es la saturación de recursos, aunque también crece el número de usuarios que no tienen servicio o que están fuera de la cobertura de la red. Esta variable, la de la saturación de recursos, respecto a simulaciones anteriores es la que más crecimiento ha experimentado. Esto es debido a que ya estamos comenzando a llegar al límite de la saturación de la red. A partir de este punto los usuarios que quieran conectarse, sobre todo en zonas urbanas, experimentarán una falta de cobertura debido a que no hay recursos. Si aumentáramos el número de usuarios realizando una simulación con un

scaling factor mayor de 9, la proporción actual no se cumpliría, originándose un colapso de la red, inaceptable para un entorno urbano. Así, con este *Traffic Load* del 64% se ha establecido el límite del rendimiento de la web.

Después de analizar para cada caso los diferentes datos de las simulaciones según el *scaling factor*, a continuación se van a desglosar, para cada grupo de simulaciones, sus resultados según los servicios demandados.

	Traffic Load	Scaling Factor 1		Scaling Factor 3		Scaling Factor 6		Scaling Factor 9	
		7,23%		21,72%		43,47%		64%	
		Demand	Results	Demand	Results	Demand	Results	Demand	Results
FTP Download	Users	881,2	879,9	2.658,7	2.654,7	5.284,9	5.276,9	7.915,5	7.903,5
	Active DL	212,6	212,2	638,0	637,1	1.263,0	1.260,7	1.887,7	1.884,3
	Active UL	209,8	209,3	637,5	636,8	1.272,9	1.271,6	1.891,2	1.888,7
	Active DL+UL	316,8	316,4	968,0	966,8	1.896,0	1.893,0	2.850,3	2.846,3
	Inactive	142,0	142,0	415,2	414,0	853,0	852,1	1.286,4	1.284,2
	Effective RLC Aggregate Throughput (DL)		11,5		33,9		64,5		94,7
	Effective RLC Aggregate Throughput (UL)		12,2		37,1		73,1		109,2
Video Conferencing	Users	1.383,3	1.382,2	4.102,8	4.100,5	8.242,0	8.242,8	12.441,7	12.429,6
	Active DL	1.056,2	1.055,2	3.128,8	3.127,4	6.275,4	6.270,8	9.507,1	9.497,4
	Active UL	321,9	321,8	959,0	958,1	1.942,0	1.940,4	2.889,7	2.887,3
	Active DL+UL	5,2	5,2	15,0	15,0	31,6	31,6	44,9	44,9
	Inactive	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Effective RLC Aggregate Throughput (DL)		255,5		697,7		1.333,8		1.902,3
	Effective RLC Aggregate Throughput (UL)		40,3		119,9		242,5		360,6
VoIP	Users	93,0	92,9	266,2	266,2	533,1	533,1	801,2	801,0
	Active DL	45,0	45,0	131,1	131,1	254,1	254,1	394,4	394,2
	Active UL	48,0	47,9	135,0	135,0	278,9	279,0	406,1	406,1
	Active DL+UL	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	0,7
	Inactive	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Effective RLC Aggregate Throughput (DL)		41,2		116,3		208,8		277,0
	Effective RLC Aggregate Throughput (UL)		6,0		16,5		34,3		49,9
Web Browsing	Users	51,9	51,9	167,4	167,4	315,2	315,1	482,7	482,3
	Active DL	14,4	14,4	40,8	40,8	78,4	78,3	123,3	123,3
	Active UL	11,7	11,7	43,4	43,4	83,7	83,7	116,9	116,7
	Active DL+UL	13,3	13,3	40,7	40,7	77,0	77,0	120,1	120,0
	Inactive	12,5	12,5	42,5	42,5	76,1	76,1	122,4	122,3
	Effective RLC Aggregate Throughput (DL)		3,3		9,4		17,1		26,0
	Effective RLC Aggregate Throughput (UL)		3,0		10,4		19,9		29,2

Tabla 17. Descripción por servicio de las diferentes simulaciones realizadas.

En la tabla del capítulo anterior respecto a la movilidad de usuarios se pueden ver los diferentes desgloses por servicio de los diferentes grupos de simulaciones. Como en el caso en el que se ha descrito el comportamiento general podemos ver los diferentes estados en los que se puede encontrar el usuario pero en este caso para los distintos tipos de servicio que ofrece la red.

Lo primero que se debería resaltar es que los servicios de *VoIP* y *Web Browsing* son los más demandados por parte de los usuarios. Es normal que así pase ya que en los servicios definidos para los distintos tipos de usuario (ver de las características de los perfiles de usuario del capítulo anterior) quedan definidos de forma que predominen estos dos por encima del *FTP Download* y el *Video Conferencing*. Es normal que se dé esta distribución de los servicios por la siguiente razón. En la densidad de usuarios definida en el mapa de tráfico se inserta una distribución de usuarios equitativa en la relación de *Business* y *Standard Users*. En el caso de *Business User* sí que tiene definidos los cuatro tipos de servicio, pero en el caso del *Standard User* solamente tiene definidos los servicios de *VoIP* y *Web Browsing*, de esta manera es fácil entender por qué hay tanta diferencia en el reparto de servicios.

También es importante señalar que no existe la misma linealidad en la distribución de los usuarios que respecto a los servicios ofertados. Es decir, sí que se puede comprobar que la cantidad de usuarios sigue una escala lineal a la hora de realizar el estudio usando diferentes *scaling factors*. No se ha de sobreentender que se consumirán servicios atendiendo a la misma escala lineal, eso depende del *scheduler*, que en el caso de este proyecto se ha escogido el *Round Robin*, por considerar que es el que trata de manera más justa a los diferentes usuarios, al repartir de forma equivalente los recursos para cada usuario en concreto.

5.3.3. Cobertura $C/(I+N)$ inicial

La predicción *Coverage by $C/(I+N)$* nos permite conocer para cada pixel del mapa el estado de la señal respecto al ruido y las interferencias. No es propiamente la SNR (*Signal to Noise Ratio*), sino que añade a ello las posibles interferencias de los transmisores vecinos. Para ello, es necesario hacer con anterioridad una simulación de Monte Carlo para el caso dado, en función de la densidad de usuarios de la red. Anteriormente se han definido los umbrales de portadora según el nivel de $C/(I+N)$.

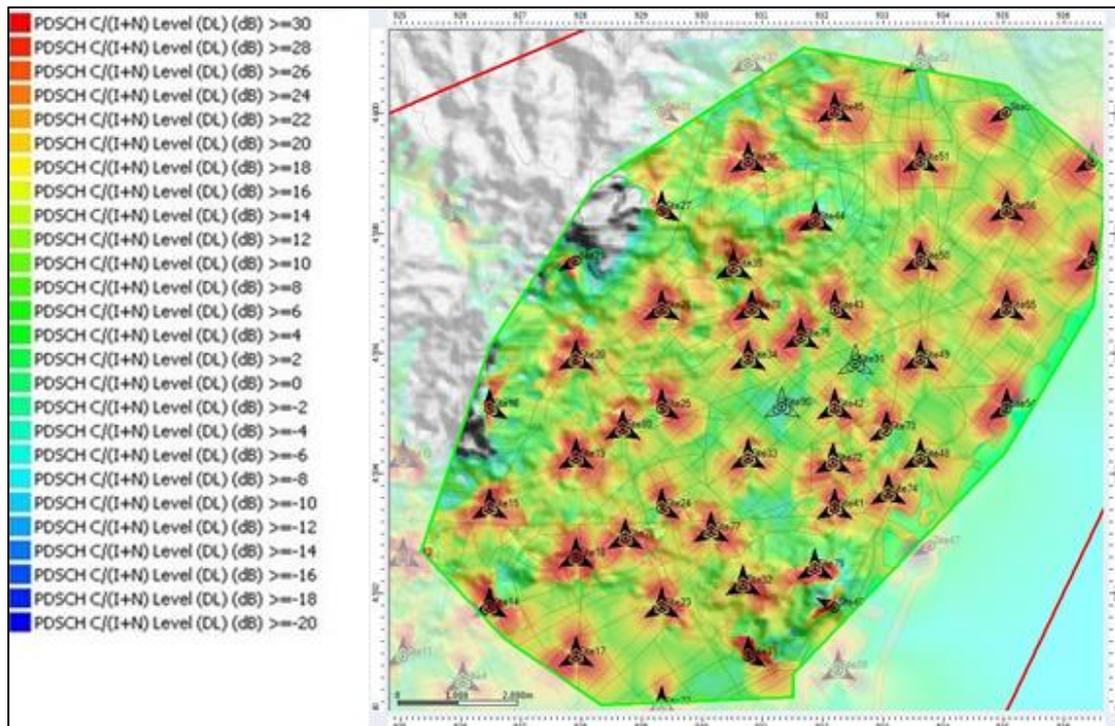


Figura 29. Resultado de la predicción Coverage by $C/(I+N)$ con SF3.

La figura anterior se muestra el resultado de la predicción utilizando un *scaling factor* igual a 3. Como muestra la figura se puede comprobar que existen algunas zonas del mapa en las que no hay cobertura. Estas zonas concuerdan con las de la predicción por nivel de señal, que por culpa de accidentes topográficos no garantiza un nivel de servicio óptimo. Son aquellas zonas en las que no garantizamos una calidad de señal ($C/(I+N)$) suficiente para alcanzar un *Bearer*. Remitiendo a la Figura 19 de los *Bearer Selections* podemos comprobar que el nivel más bajo de $C/(I+N)$ para adquirir el primer *Bearer* es el -6,5 dBm. Con lo que en esos píxeles no habrá ningún tipo de servicio.

Observando la imagen con más detalle es interesante resaltar una zona en concreto perteneciente a un área *Dense Urban*. Esa zona es la que corresponde con la zona de la *Avenida Diagonal* y el final de *Via Augusta*. Esa es una parte del mapa en la que hay una alta densidad de usuarios pero en cambio no se garantiza una buena calidad de servicio, llegando a niveles de PDSCH bajos, del orden de -8 dB.

Es por ello que se ha considerado una segunda etapa en el diseño de la red, esta vez teniendo en cuenta el mapa de tráfico. Ya se ha comentado que la calidad depende del *bearer* seleccionado. Si en un entorno urbano no queda más remedio que seleccionar el *bearer 1* es que el diseño de la red es deficiente. Es por ello que se va a abordar el diseño de la red en el próximo apartado.

5.3.4. Optimización de la red considerando al mapa de tráfico

En esta segunda etapa de la optimización de la red, ya teniendo en cuenta la influencia de la densidad de usuarios en la red, se ha tomado la decisión de incluir dos estaciones base más con sus correspondientes transmisores: Site90 y Site91. La razón de la inclusión de estas estaciones es muy sencilla. Al examinar el nivel de cobertura en la zona *Dense Urban* localizada en la *Avenida Diagonal*, se ha detectado un pozo de cobertura debido fundamentalmente a la alta densidad de usuarios a los que hay que dar servicio, elemento que propicia la falta de recursos de la red. Por este motivo se ha

decido incluir estas dos estaciones base nuevas, para mejorar la calidad de la señal e intentar dar un mejor servicio a los diferentes usuarios de la red.

Site90 x: 931,324 y: 4,595,102 z: 45 m.
 Site91 x: 931,541 y: 4,595,817 z: 25 m.

El procedimiento a partir de aquí será el de evaluar las predicciones realizadas, de manera que se justifique el nuevo diseño de la red. De forma resumida, el nuevo diseño consiste en la desactivación de un cierto número de transmisores, la reubicación de dos estaciones bases y la instalación de dos estaciones bases nuevas. Con este nuevo diseño se van a realizar las predicciones por nivel de señal y de calidad de enlace PDSCH con el nuevo diseño realizado.

5.3.4.1. Cobertura por nivel de señal de la red optimizada

Una vez realizadas las modificaciones en la red, y considerando el nuevo diseño de la red, se procede a realizar de nuevo el estudio de nivel de cobertura repitiendo la predicción *Coverage by Signal Level*.

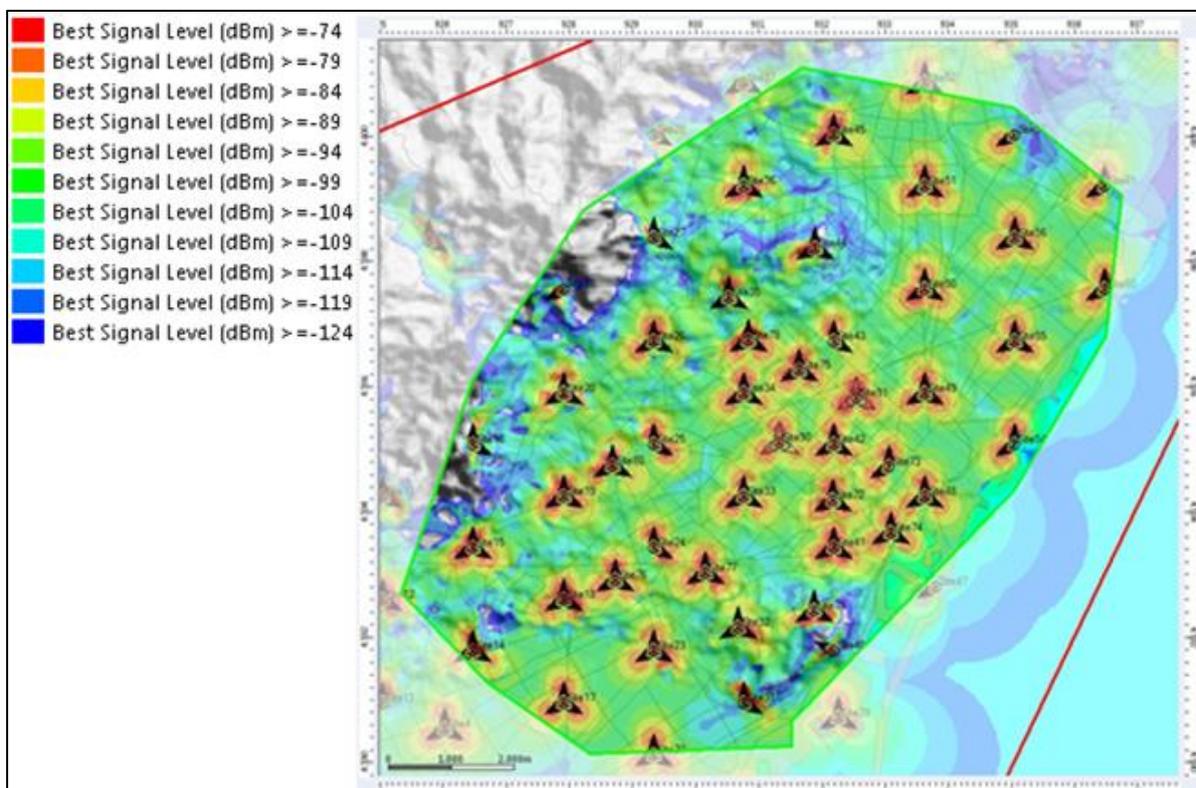


Figura 30. Resultado de la predicción *Coverage by Signal Level* con la red optimizada.

A continuación se han exportado los datos de ambas predicciones *Coverage by Signal Level* (para el caso de la red sin optimizar y con la red optimizada), de las que obtenemos los siguientes resultados:

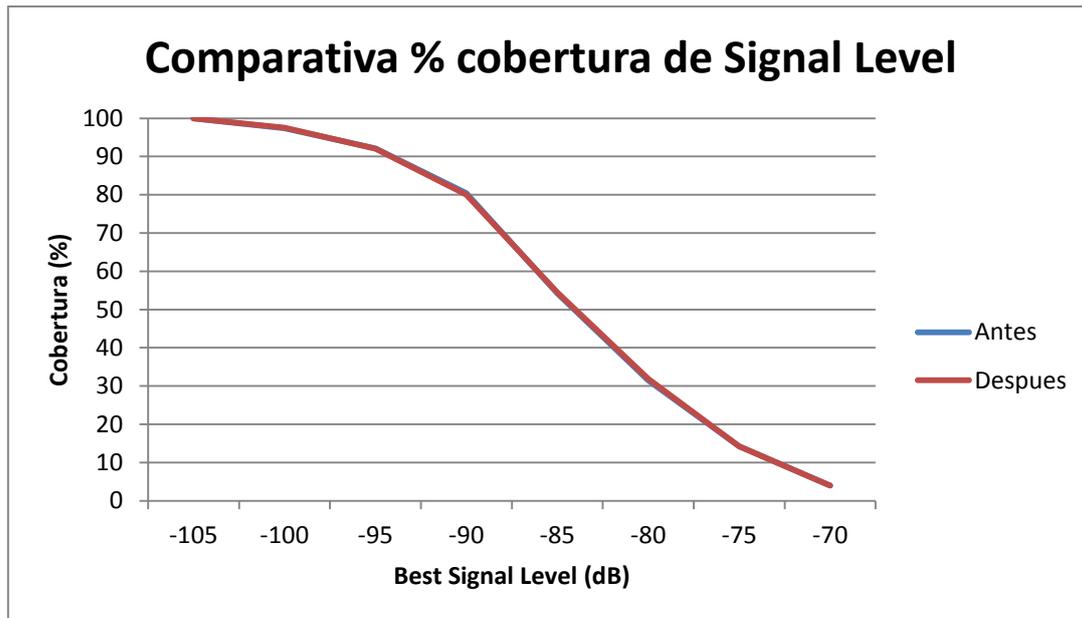


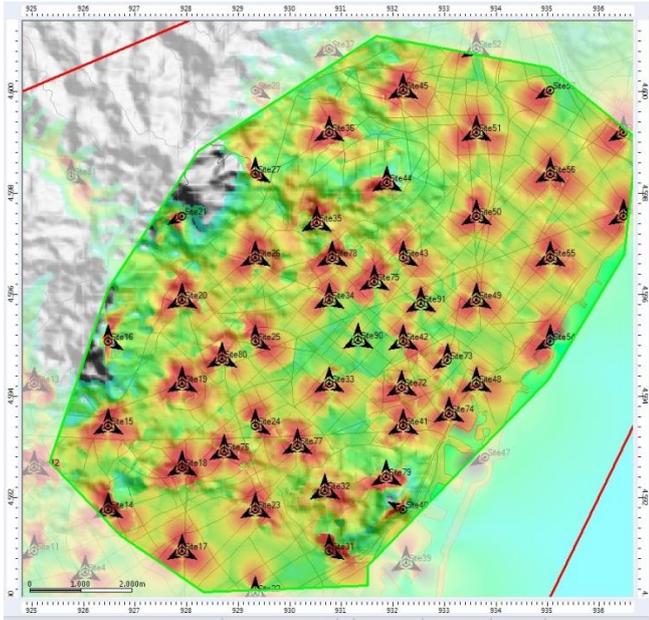
Figura 31. Comparativa de % Covered Area entre caso inicial y optimizado.

En la Figura 31 se puede apreciar la poca diferencia que supone la diversas modificaciones que se han introducido en las diferentes etapas de la optimización de la red. En ella se puede comparar el nivel de señal recibida para la celda de la zona calculada. Haciendo caso a la gráfica y viendo la imagen de la *Coverage by Signal Level* del caso actualizado podemos comprobar que habrá pocos usuarios que tengan el máximo nivel de señal (-70 dBm), que corresponderán con los que se encuentran situados más cercanos a la antena. A medida que nos vamos alejando de la antena, nuestro nivel de señal se reducirá, tal y como el modelo de propagación sugiere, que el nivel de señal sea inversamente proporcional a la distancia de la antena. En este caso, y dado que en la red la sensibilidad está definida a -124 dBm ambos diseños son aceptables. Pero el objetivo era ver cuánto había mejorado la calidad de la señal respecto al caso inicial y comprobando para los dos casos diferentes (inicial y optimizado) vemos que no hay mucha diferencia.

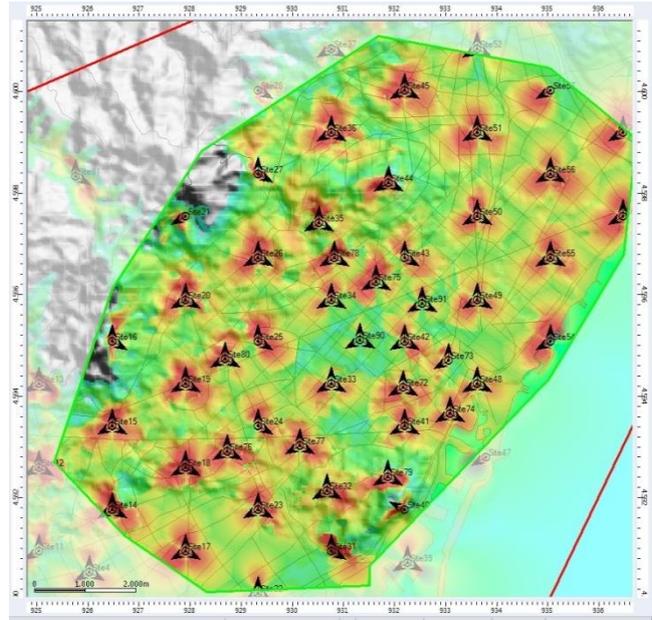
A priori podría parecer que la inclusión de dichos transmisores es insuficiente para mejorar el rendimiento de la red en la zona de interés. En el próximo apartado, realizando nuevamente la predicción de *Coverage by C/(I+N)*, se puede comprobar la mejora del diseño y la razón de su necesaria inclusión en la red.

5.3.4.2. Cobertura por $C/(I+N)$ de la red optimizada

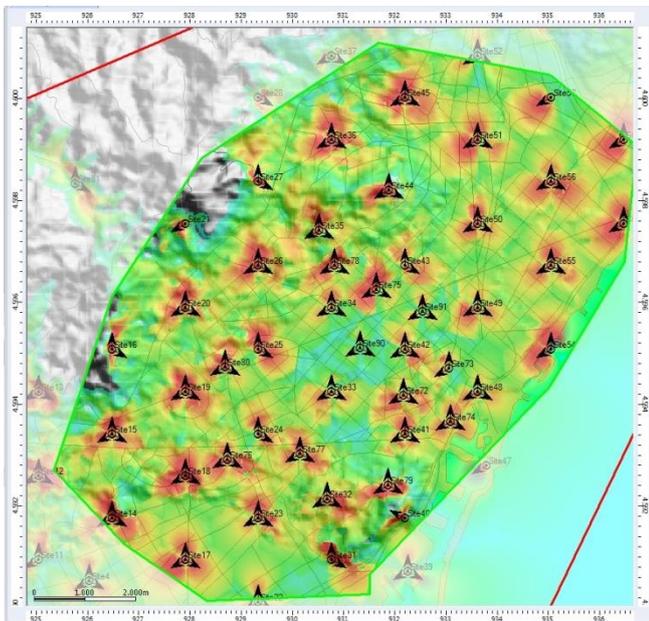
Una vez que se ha visto que el nivel de la señal es el adecuado para la red, a continuación se procede a estudiar la calidad que presenta el diseño. Se han realizado predicciones *Coverage by C/(I+N)* tanto para *downlink* como para *uplink* para las simulaciones realizadas anteriormente. Ya se ha visto que estas predicciones dependen del tráfico de la red. Se ha realizado el estudio utilizando las cuatro simulaciones antes indicadas, obteniendo los siguientes resultados:



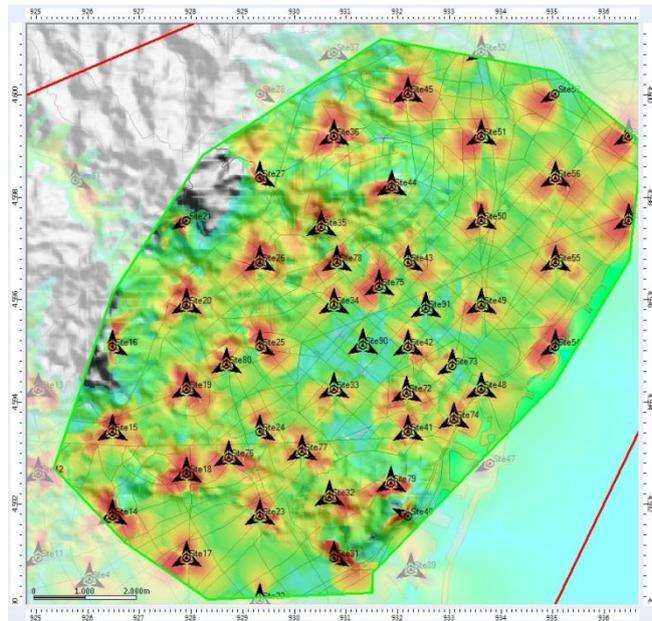
Scaling Factor de 1



Scaling Factor de 3



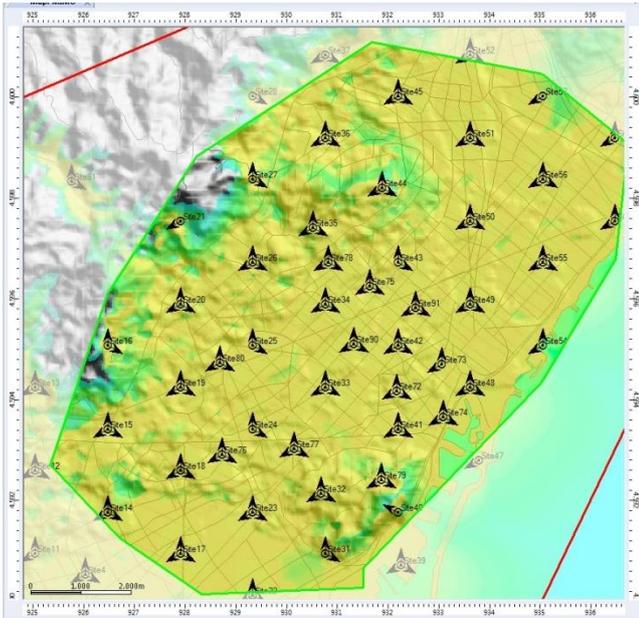
Scaling Factor de 6



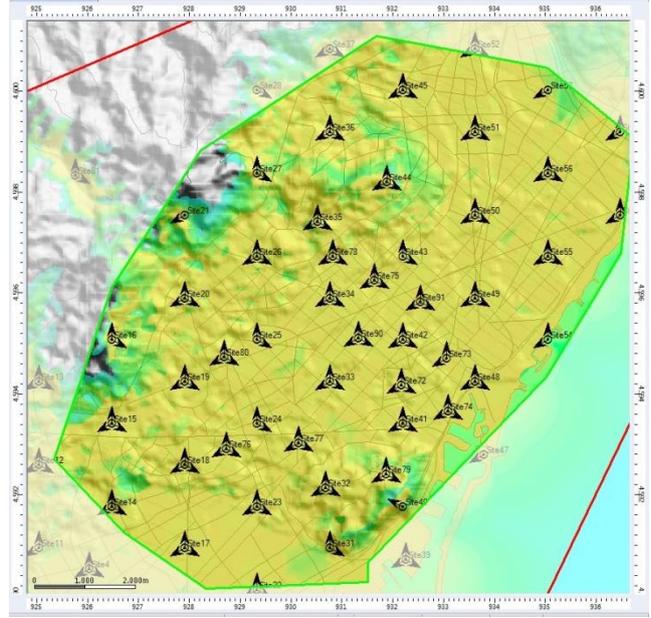
Scaling Factor de 9



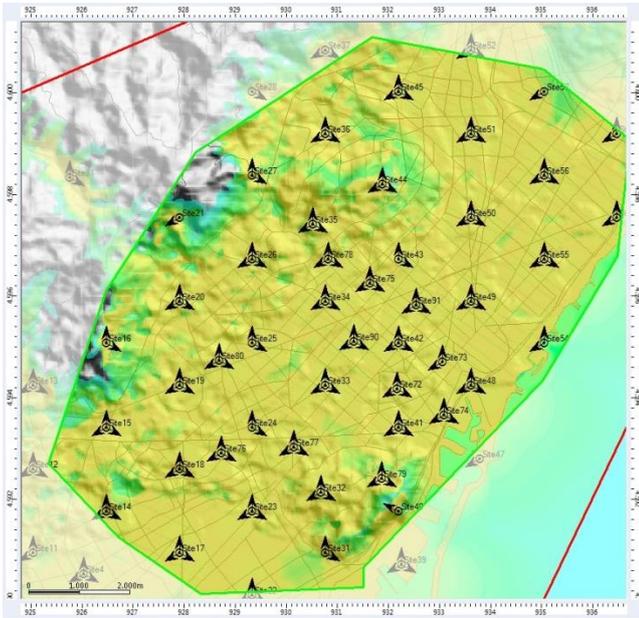
Figura 32. Resultado de las predicciones Coverage by $C/I+N$ for DL para las diferentes condiciones de tráfico.



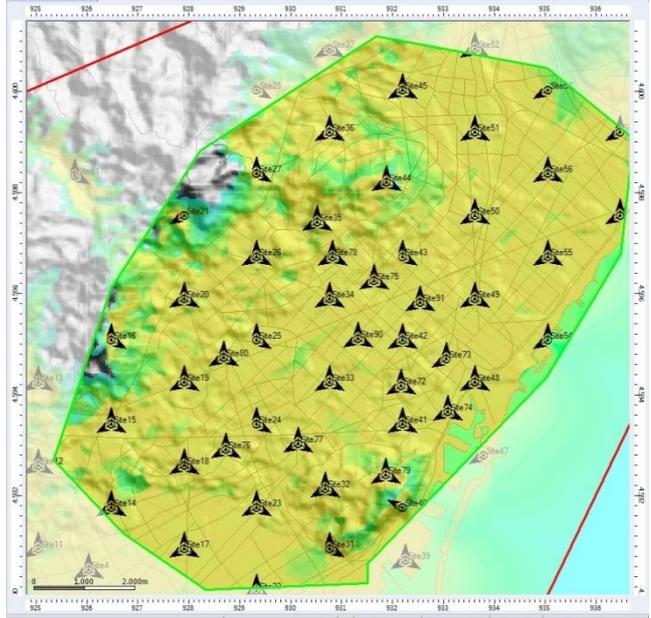
Scaling Factor de 1



Scaling Factor de 3



Scaling Factor de 6



Scaling Factor de 9



Figura 33. Resultado de las predicciones Coverage by C/(I+N) for UL para las diferentes condiciones de tráfico.

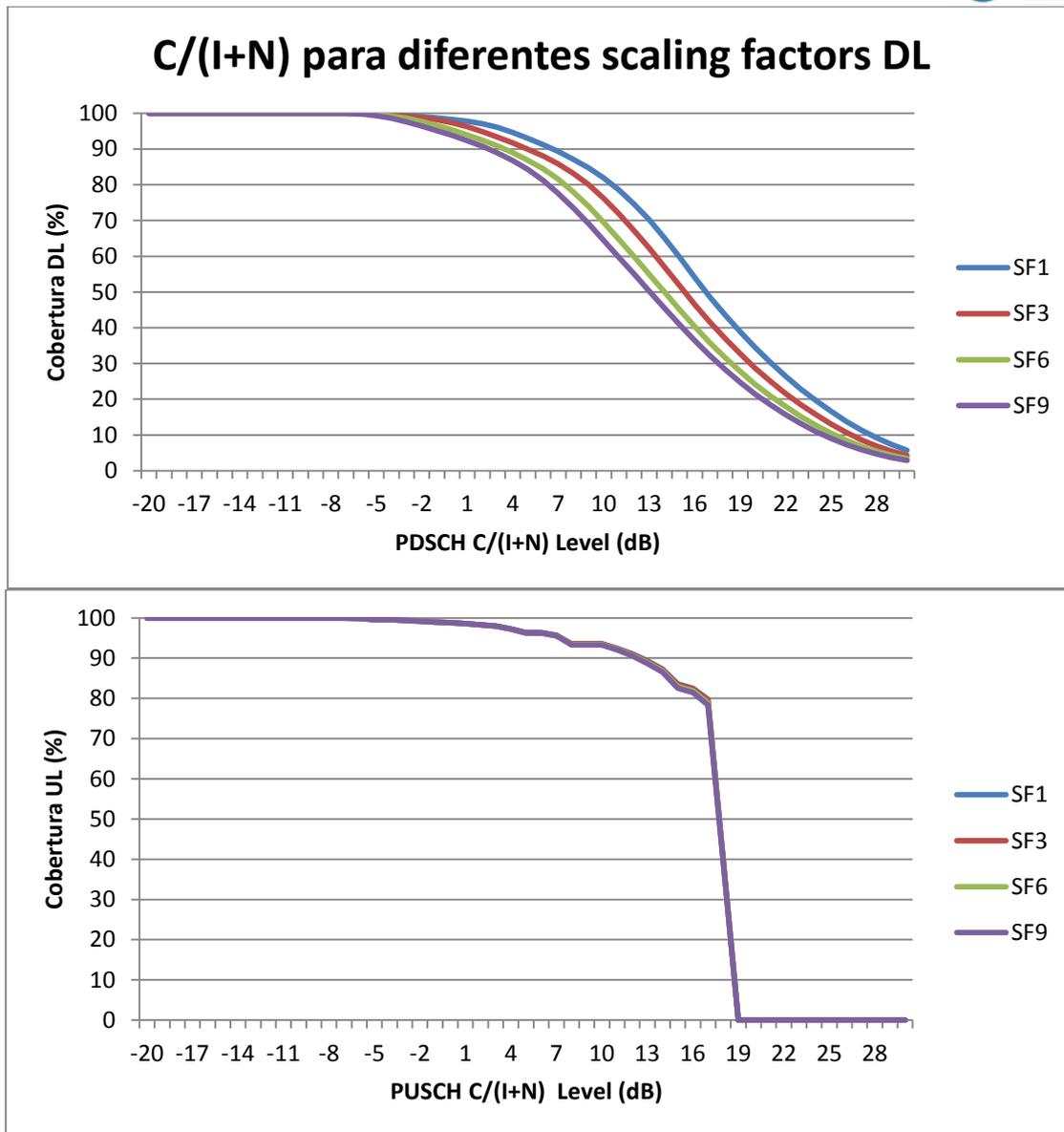


Figura 34. Comparación del nivel en dB's del canal PDSCH tanto en *downlink* y del PUSCH en *uplink*.

Como se puede apreciar en la Figura 34, donde se contempla visualmente el resultado al realizar las predicciones según el *scaling factor*, existe una gran diferencia, como ya se ha comentado para el caso en el que realizamos el estudio para el *downlink* o para *uplink*.

Para el caso del enlace *downlink* se puede comprobar en la figura anterior que la cobertura disminuye a medida que se aumenta el *scaling factor* de las simulaciones. Debido a la alta demanda de servicio en el enlace descendente, a medida que se aumentan los usuarios, las interferencias que llegan a la estación base van aumentando. Como se puede apreciar en la figura que representa la cobertura, las diversas predicciones según las diversas simulaciones no ocasionan pérdidas de cobertura en las zonas de interés, indicando un diseño óptimo de la red. Otro de los objetivos que era importante comprobar era la mejora del estado de la red en la zona de interés, donde se localizaba un pozo de cobertura al aumentar los usuarios. Como se puede comprobar en la Figura 33, el problema de la cobertura del $C/(I+N)$ en el caso de una alta densidad de usuarios (SF6) se ha solucionado al instalar una estación base, dando lugar a una mejora en la calidad del servicio.

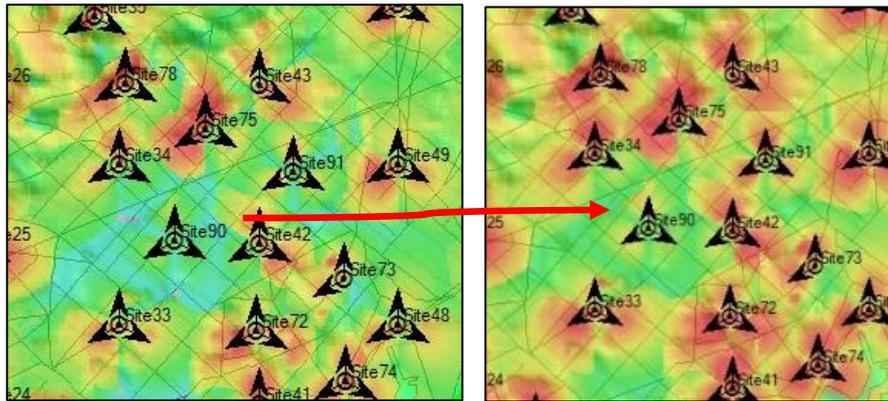


Figura 35. Comparación del nivel de PDSCH en la zona de interés.

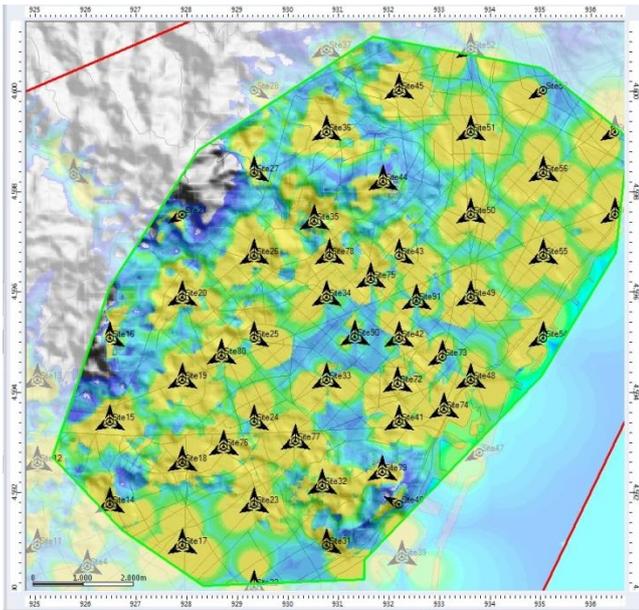
Para el enlace *uplink* comprobamos que las tres predicciones son exactamente iguales. No existe diferencia, o es muy pequeña, si realizamos el estudio del nivel de potencia del canal PUSCH para simulaciones con diferentes *scalings factors*. Esto ya se podía prever ya que como se ha visto en la Tabla 16 el número de usuarios que requieren del enlace ascendente es mucho menor de los que requieren del enlace descendente.

5.3.4.3. Cobertura por *Throughput* de la red optimizada

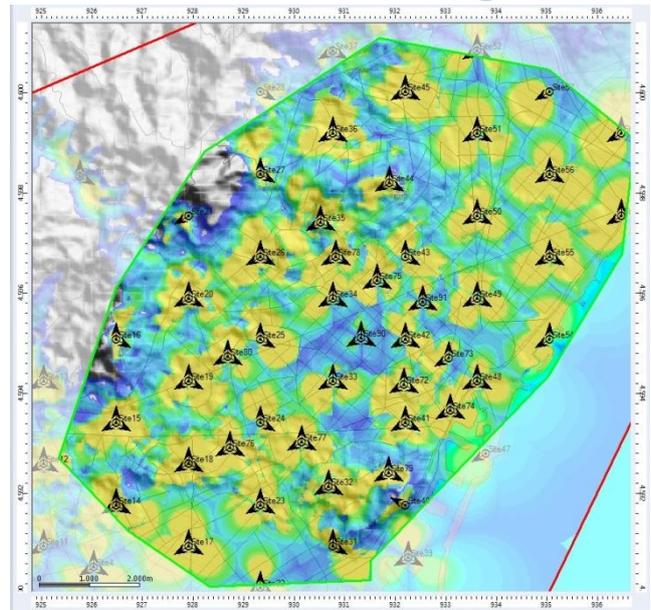
En este apartado se va a comprobar la calidad de transmisión de datos tanto en el enlace ascendente como en el descendente. Para ello se va a realizar la predicción que dispone ATOLL llamada *Coverage by Throughput*. Se ha realizado el estudio con *Effective Channel Throughput*. Como se ha visto anteriormente, este tipo de predicción determinará el *throughput* neto que puede ser obtenido por la celda. Esta predicción permite estudiar por separado el enlace *downlink* y el enlace *uplink*.

Considerando el sistema implementado, para ATOLL una portadora de LTE de 10 MHz de ancho de banda, con el Radio Bearer de máxima eficiencia (No. 15: 64QAM, $r=11/12$), los usuarios consiguen un máximo *Throughput* posible de unos 38 Mbps. Ese es el resultado máximo que se podrá alcanzar para este caso en concreto.

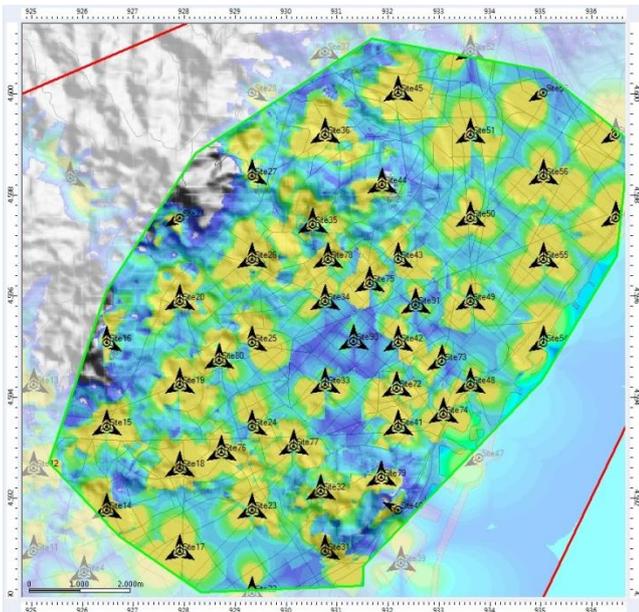
En las dos próximas figuras se va a poder visualizar el comportamiento de la red para las diferentes simulaciones mencionadas anteriormente, solamente variando el parámetro *scaling factor* de las simulaciones. Estas predicciones mostradas son las predicciones *Coverage by Throughput* para ambos enlaces considerando las diferentes simulaciones:



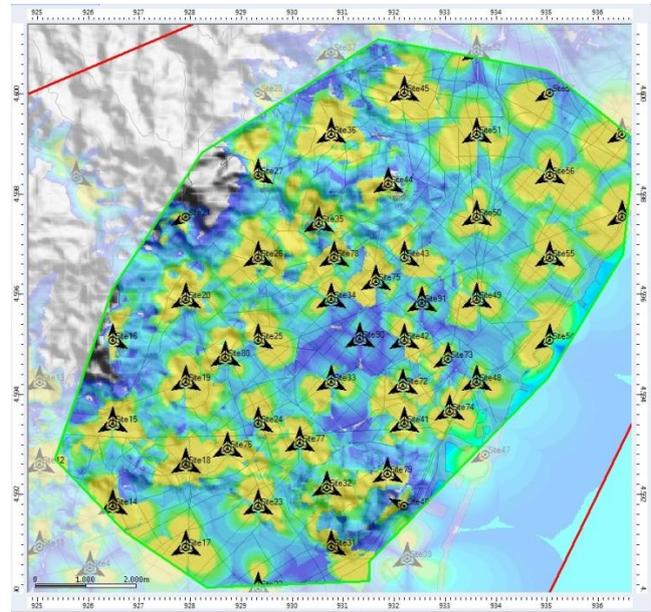
Scaling Factor de 1



Scaling Factor de 3



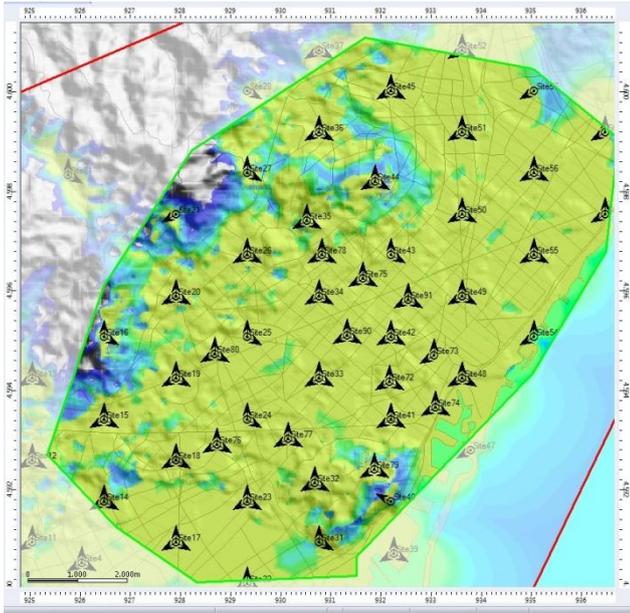
Scaling Factor de 6



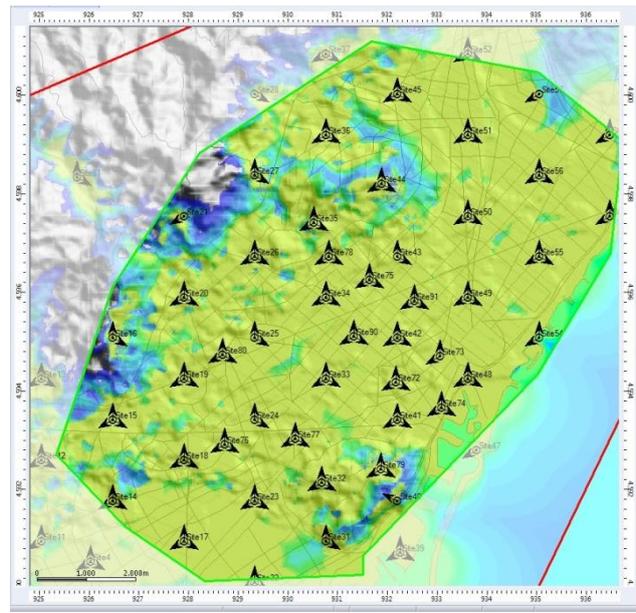
Scaling Factor de 9



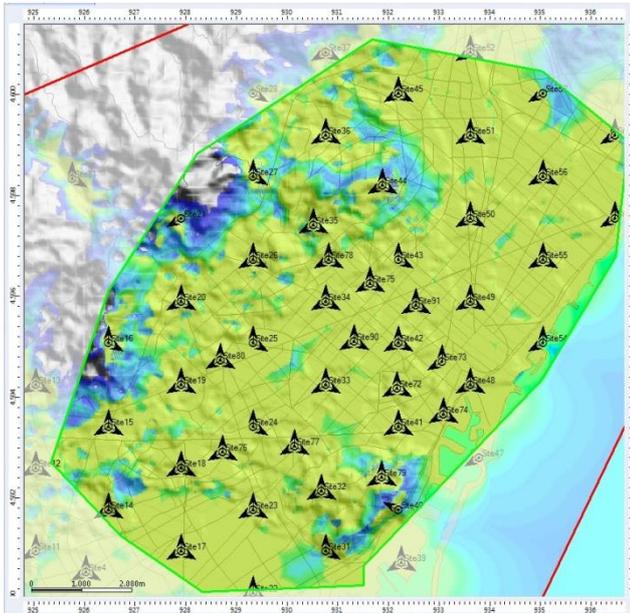
Figura 36. Resultado de las predicciones Coverage by Throughput for DL para las diferentes condiciones de tráfico.



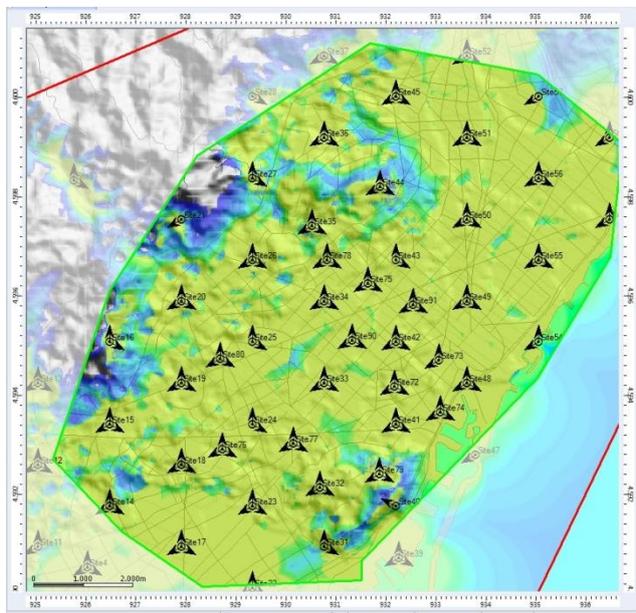
Scaling Factor de 1



Scaling Factor de 3



Scaling Factor de 6



Scaling Factor de 9

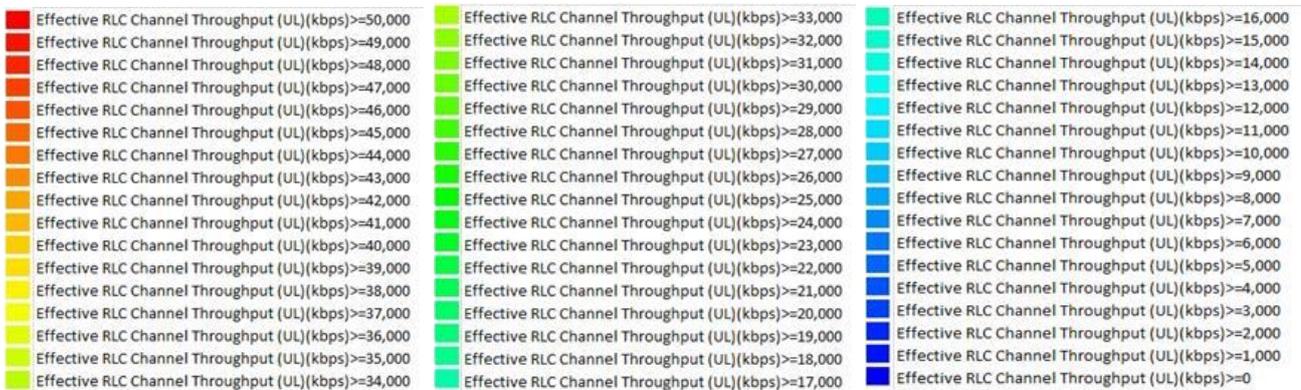


Figura 37. . Resultado de las predicciones Coverage by Throughput for UL para las diferentes condiciones de tráfico.

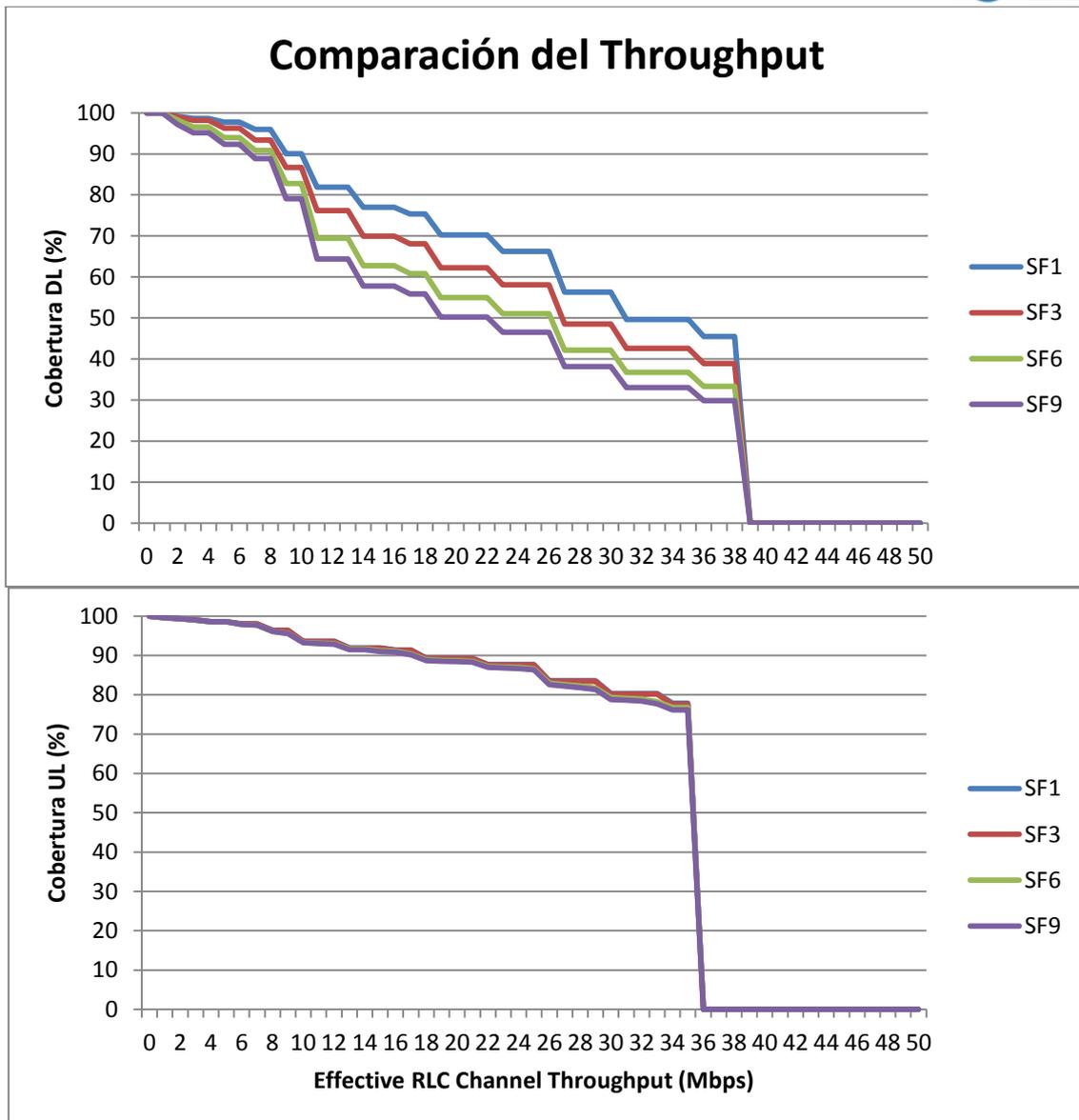


Figura 38. Comparación del *Effective RLC Channel Throughput* para diferentes *scaling factors*.

Como se puede apreciar en las Figura 38 existe un gran diferencia entre el *Throughput* para el caso de enlace ascendente como en el caso descendente. Podemos comprobar, que al igual que ocurría para la predicción *Coverage by C/(I+N)* del apartado anterior, a medida que aumentamos el *scaling factor*, es decir, el número de usuarios en la red, el nivel de cobertura de *Throughput* para el *downlink* desciende. Y que, de forma similar, para el *uplink* el nivel de cobertura de *Throughput* no varía sustancialmente. Como ocurría en el caso de *Coverage by C/(I+N)* dos causas fundamentales: que los servicios demandados priorizan el enlace descendente y que el nivel de cobertura disminuye a medida que se aumentan el número de usuarios.

Para el caso del enlace *downlink* podemos comprobar que a medida que aumentamos el *scaling factor* de la red, la cobertura global del *Throughput* irá disminuyendo de forma general. También se observa, sobretodo en el caso de *scaling factor* 6 y 9, que los resultados convergen de manera que el 30% de los usuarios alcanzará el nivel máximo de *Throughput* de 38Mbps, sea cual sea la distribución de usuarios. Otra conclusión que sea extrae observando los mapas de cobertura es que los niveles más altos de señal estarán situados en los puntos más cercanos de la estación base, este nivel de cobertura lo encontraremos sobre todo en los puntos más cercanos a las antenas, ya que son los que presentan mejor calidad de canal y pueden transmitir sin tener en cuenta posibles efectos de ruido o interferencias. Otra reflexión interesante que se extrae de observar el

mapa de cobertura es que el nivel de cobertura es mayor donde la densidad de usuarios es más baja, es decir, fuera del *clutter Mean Urban*, ya que con una distribución más baja de usuarios la estación base ofrece una mayor capacidad ya que tiene mejores condiciones de canal.

Para el caso *uplink* hay poco que comentar, ya que el razonamiento es muy similar al del caso anterior del $C/(I+N)$. Como ocurría en la predicción anterior, la densidad de tráfico en el enlace ascendente es mucho menor que en enlace descendente. Es por ello que se garantiza una cobertura prácticamente del 100% con un nivel de *Throughput* de 38 Mbps.

5.4. Análisis de la cobertura aplicando técnicas MIMO

En este último apartado y después de comprobar el funcionamiento de la red para diferentes casos, se quiere considerar, de forma breve, el impacto que supondría introducir técnicas MIMO en la red. Se ha considerado en este apartado solamente la inclusión de múltiples antenas en las estaciones base, dejando a los usuarios móviles una sola antena. Es decir, en las configuraciones que veremos más adelante se han considerado las siguientes estrategias: aplicar técnicas de MIMO (Diversidad, SU-MIMO y AMS) para las siguientes configuraciones (2x2, 4x2, 4x4 y 8x2). Para cada configuración descrita se ha realizado un grupo de simulaciones de Monte Carlo y se han realizado las predicciones siguientes usando los datos obtenidos haciendo la media.

Se va a realizar el estudio considerando dos casos diferentes, en el primer se ha considerado estudiar el impacto de MIMO a nivel de célula. Las predicciones que se van a realizar son las que dependen exclusivamente del tráfico de datos, y que se han visto anteriormente: son las predicciones *Coverage by $C/(I+N)$* y *Coverage by Throughput*. En un segundo caso se ha querido comprobar el efecto de las técnicas MIMO a nivel de usuario.

5.4.1. Efecto de técnicas MIMO a nivel celular

En este apartado se va a realizar un estudio comparativo de las diferentes técnicas de MIMO a nivel celular. El procedimiento que se ha seguido es el siguiente: primeramente se ha realizado la exposición de los diferentes resultados obtenidos para la predicción *Coverage by Throughput* aplicando las diferentes técnicas MIMO que existen y posteriormente se ha realizado un análisis comparativo de las diferentes técnicas realizando la predicción *Coverage by $C/(I+N)$* . Para cada caso de tecnología se han realizado las simulaciones con un SF3 con las siguientes configuraciones en la antena: 2x2, 4x2, 4x4 y 8x2. Se ha escogido el SF3 por considerar que era el caso más representativo de la carga de la red en un estado real. Este proceso se ha realizado considerando tanto el *Throughput* por celda como el de usuario.

5.4.1.1. Estudio de cobertura por *Throughput* aplicando técnicas MIMO a nivel de celda

En este apartado se van a realizar un grupo de predicciones apoyándonos en las simulaciones antes descritas. En este caso se utilizarán todas las posibles configuraciones de MIMO señaladas al principio del apartado. Para estudiar la cobertura de *Throughput* a nivel de celda se ha realizado la predicción considerando el *Effective RLC Channel Throughput*. Una vez realizadas las predicciones, se analizará el comportamiento de cada técnica.

- Aplicando la técnica de Diversidad obtenemos los siguientes resultados:

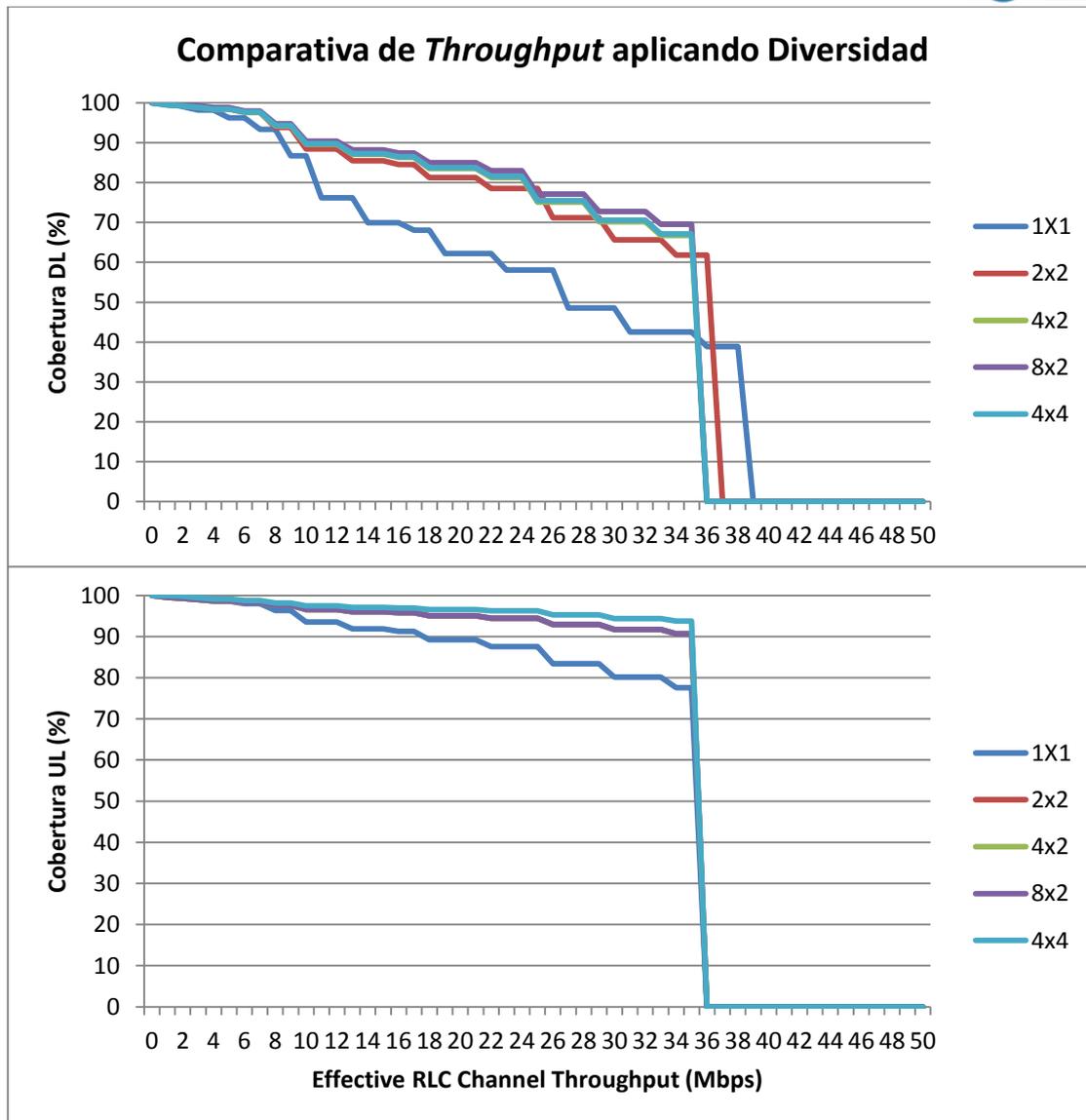


Figura 39. Comparativa del *Effective RLC Channel Throughput* para la técnica de diversidad.

Los resultados que se aprecian son los esperados. Como se ha señalado previamente la técnica de diversidad lo que hace es enviar la misma información por varios caminos diferentes, lo que provoca que en la recepción, si en lugar de utilizar un antena, se utilizan varias, el sistema llega a transmitir correctamente la información por el sistema de multicamino, aumentando la zona de cobertura, pero nunca la velocidad del *Throughput*. Esto es lo que se puede apreciar en la figura anterior. Se puede observar que tanto para PDSCH como para PUSCH, y sin importar el tipo de configuración multiantena, la cobertura ha crecido respecto al caso inicial de 1x1. Es por ello que se garantiza una alta calidad de en la transmisión de la información al aplicar esta configuración. Respecto a la velocidad de *Throughput* se puede comprobar cómo se mantiene constante para el caso del UL y que tiene una pequeña fluctuación entre las diferentes configuraciones en el caso del DL.

- Aplicando la técnica de SU-MIMO obtenemos los siguientes resultados:

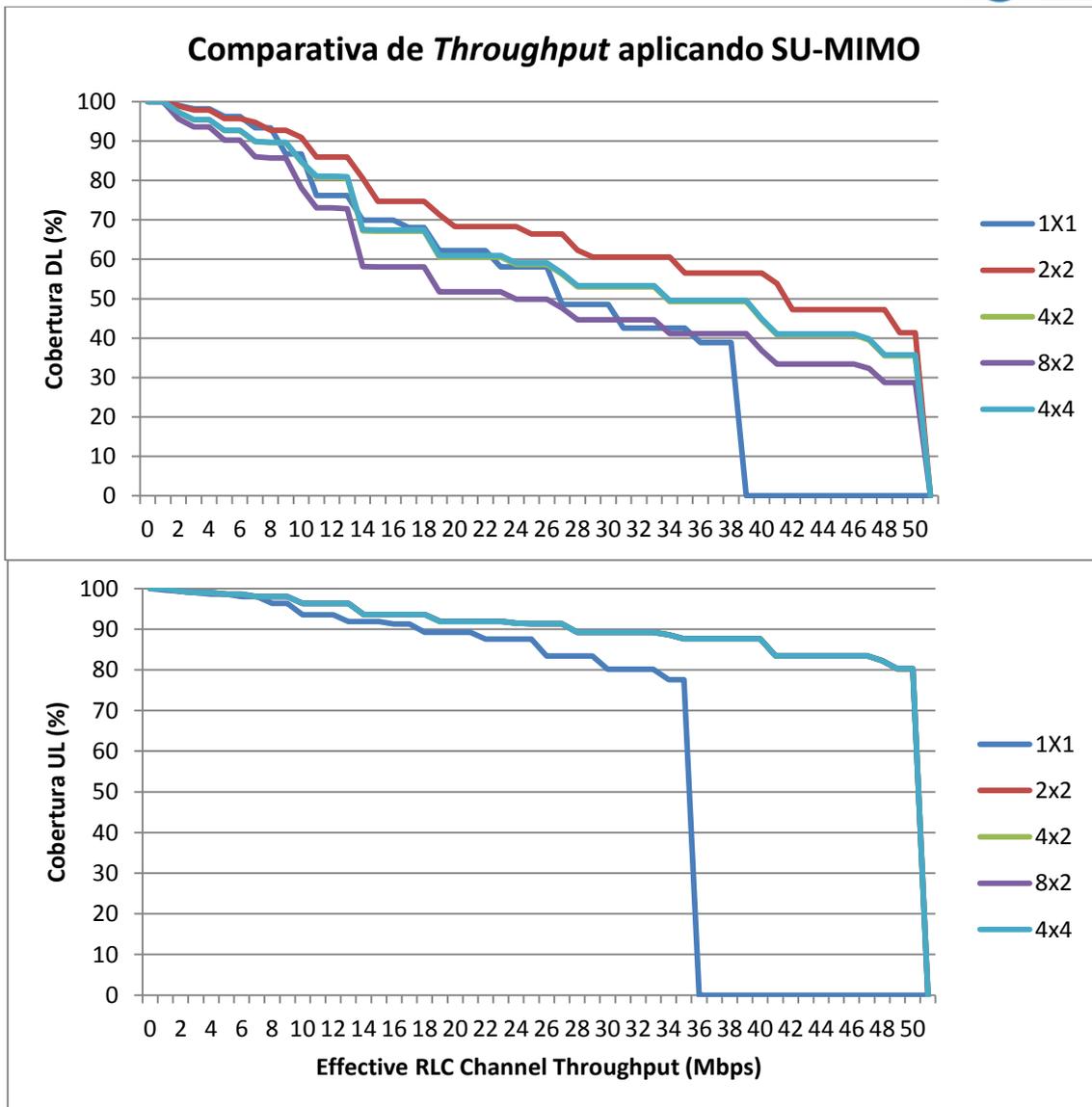


Figura 40. Comparativa del *Effective RLC Channel Throughput* para la técnica de SU.

En la Figura 40 se muestran los resultados de aplicar la predicción de *Coverage by Throughput* realizado para las diferentes configuraciones de antenas para la técnica de SU de MIMO. Se observan varias diferencias en los principales aspectos de la predicción. En primer lugar, la principal diferencia que existe es el aumento de la capacidad respecto a las predicciones anteriores. Lo que provoca este aumento de velocidad es el envío de información por diferentes flujos para un mismo usuario, aprovechando las múltiples antenas. Este aumento de la velocidad se localizará en las zonas más próximas de las antenas, llegando a niveles de hasta 50 Mbps. En segundo lugar, se observa que la cobertura aplicando la técnica de SU-MIMO mejora tanto en el caso de PDSCH como en el PUSCH. Es interesante comprobar que para el PUSCH no se observa que las diferentes configuraciones no modifican la cobertura, no así en el caso del PDSCH. En el canal de subida existen diferencias a nivel de cobertura cambiando la configuración de antenas. La capacidad respecto a las configuraciones es la siguiente: la mejor es la configuración 2x2, reduciendo la capacidad a medida que aumentamos el número de antenas en el transmisor.

- Aplicando la técnica de AMS se obtienen los siguientes resultados:

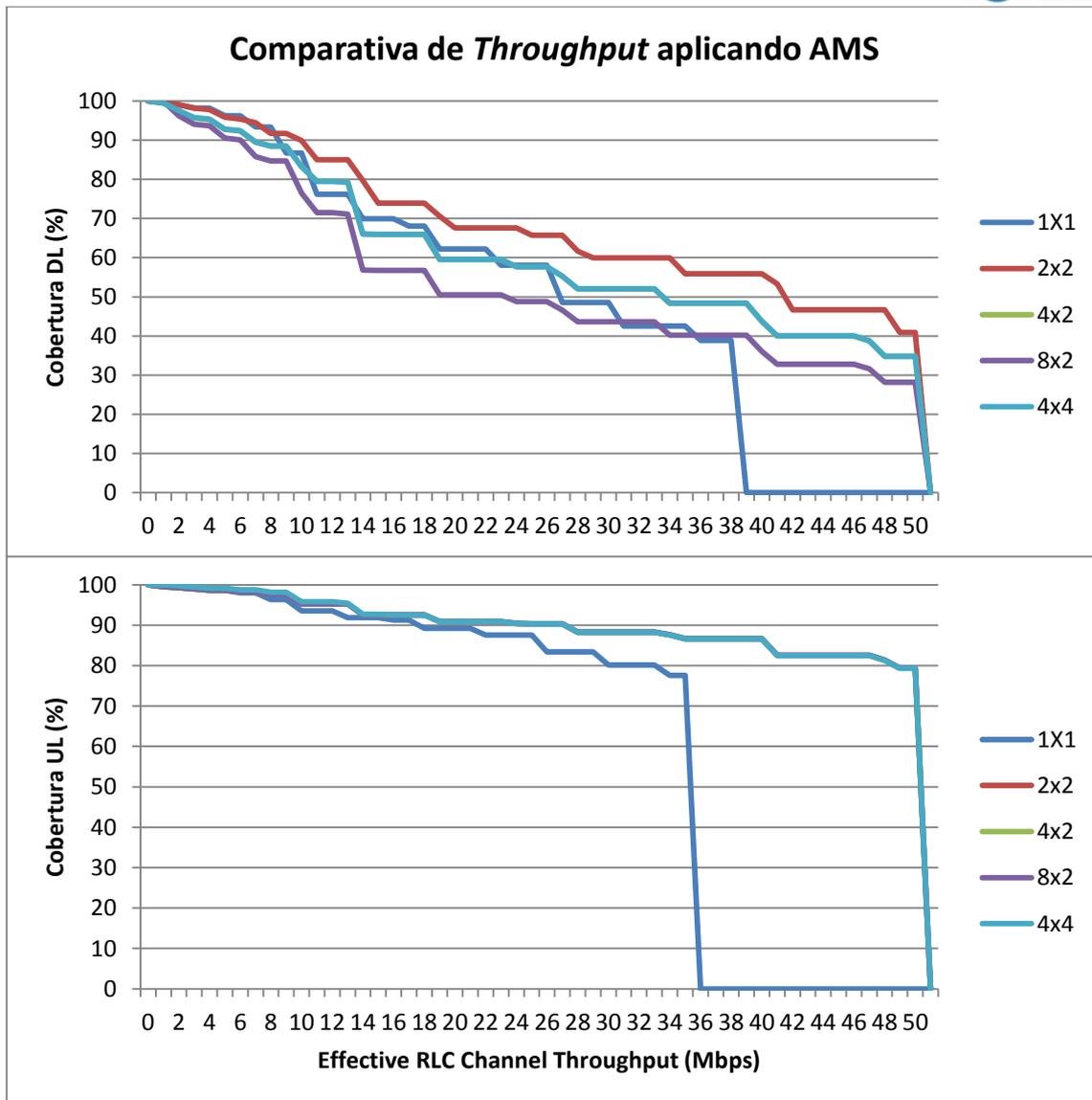


Figura 41. Comparativa del *Effective RLC Channel Throughput* para la técnica de AMS.

Se puede observar en la Figura 41 como los resultados de aplicar la técnica de AMS son muy parejos que al aplicar la técnica de SU, tanto para DL como para UL. El nivel de cobertura crece respecto al caso SISO y también se mantiene el aumento de la velocidad en los lugares cercanos a las antenas. Estas similitudes con los resultados de la técnica de SU es debido a que la técnica AMS (*Adaptative MIMO Switching*) lo que hace es conmutar las técnicas de SU y Diversidad en función del estado de la relación señal a ruido del canal. Si el canal tiene una $C/(I+N)$ buena, la técnica usada es SU, mientras que si el canal tiene una relación $C/(I+N)$ mala usará Diversidad. En el caso de la red diseñada, que los resultados de SU y AMS sean tan parejos quiere decir que la red en general existirá una relación señal a ruido muy buena para todas las celdas.

5.4.1.2. Comparativa de *Throughput* con las diferentes técnicas de MIMO a nivel de celda

En este apartado se van a comparar entre las diferentes técnicas MIMO evaluando los resultados de los diferentes niveles de cobertura para las predicciones *Coverage by Throughput* realizadas en el apartado anterior. La comparación se realizará tanto para *downlink* y para *uplink*.

Dado que las otras configuraciones (4x2, 8x2, 4x4) se ha considerado oportuno considerar los resultados obtenidos solamente considerando la configuración 2x2. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

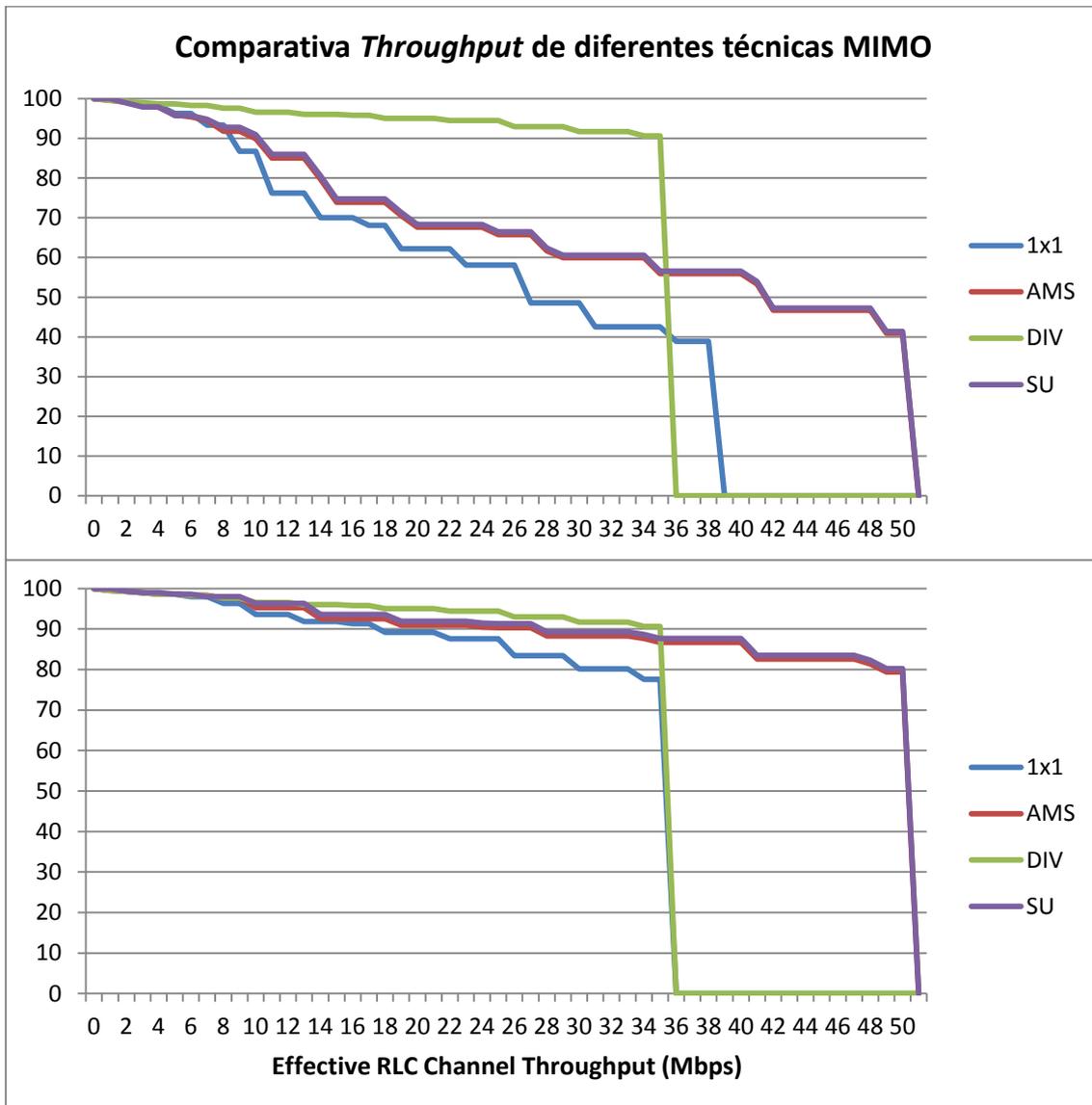


Figura 42. Comparativa del *Effective RLC Channel Throughput* para las diferentes técnicas MIMO con un mismo *scaling factor=3*.

En la Figura 42 se puede comprobar que existe una gran diferencia cuando aplicamos las diferentes técnicas MIMO, para la misma densidad de usuarios. Para el enlace *downlink* se observa que aplicando la técnica de Diversidad es la que ofrece los mejores resultados, es la que mayor nivel de cobertura va a otorgar a los usuarios. Para el caso de AMS y SU los resultados son los mismos por la razón señalada anteriormente, de que el estado del canal es muy bueno. Ello supone un aumento en la capacidad de que se localiza en los lugares más cercanos de los terminales, ofreciendo niveles de 50 Mbps.

Para el caso del enlace *uplink* podemos apreciar en la figura que no que existe una gran diferencia a la hora de obtener un cierto nivel de cobertura. Para las diferentes técnicas se obtiene el mismo resultado a nivel de cobertura, no así en las técnicas de AMS y SU, que como ya se ha mencionado una de sus propiedades es la de aumentar la capacidad.

5.4.1.3. Estudio de cobertura por *Throughput* aplicando técnicas MIMO a nivel de usuario

En este apartado se van a exponer las diferentes predicciones realizadas para la cobertura de *Throughput* a nivel usuario. La diferencia con el apartado anterior radica en que lo que se ha evaluado ha sido el *Effective RLC User Throughput*. Una vez realizadas las predicciones, se analizará el comportamiento de cada técnica.

- Aplicando la técnica de Diversidad obtenemos los siguientes resultados:

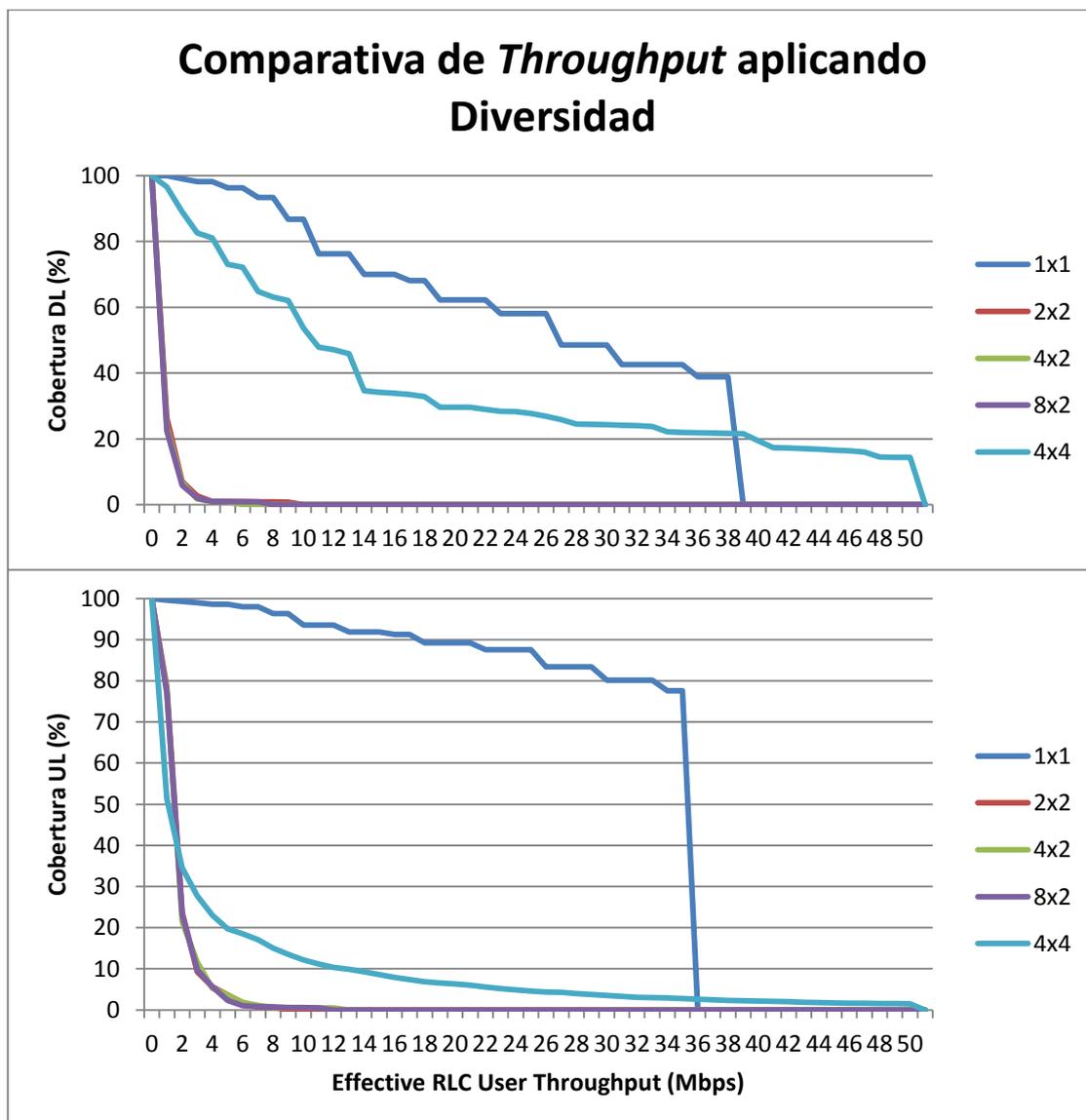


Figura 43. Comparativa del *Effective RLC User Throughput* para la técnica de diversidad.

Los resultados de las predicciones calculadas son los esperados. En general están muy por debajo de los obtenidos realizando la predicción sobre el *Effective RLC User Throughput* están muy por debajo tanto para los calculados realizando la predicción sobre el *Effective RLC Channel Throughput* como los realizados para el caso anterior a configurar MIMO en el sistema. Esto es debido al factor limitante de las interferencias vecinas. La interferencia multicamino, y más en diversidad, ya que se envía la misma información por diferentes vías, provoca que a el *Throughput* a nivel usuario se vea altamente limitado, ofreciendo unas coberturas muy bajas. Solamente en el caso

de que la configuración sea la de 4x4, se podría tener un nivel de cobertura aceptable, solamente el 20% de los usuarios alcanzaría los 50 Mbps, aunque estaría muy por debajo del caso original de SISO.

- Aplicando la técnica de SU-MIMO obtenemos los siguientes resultados:

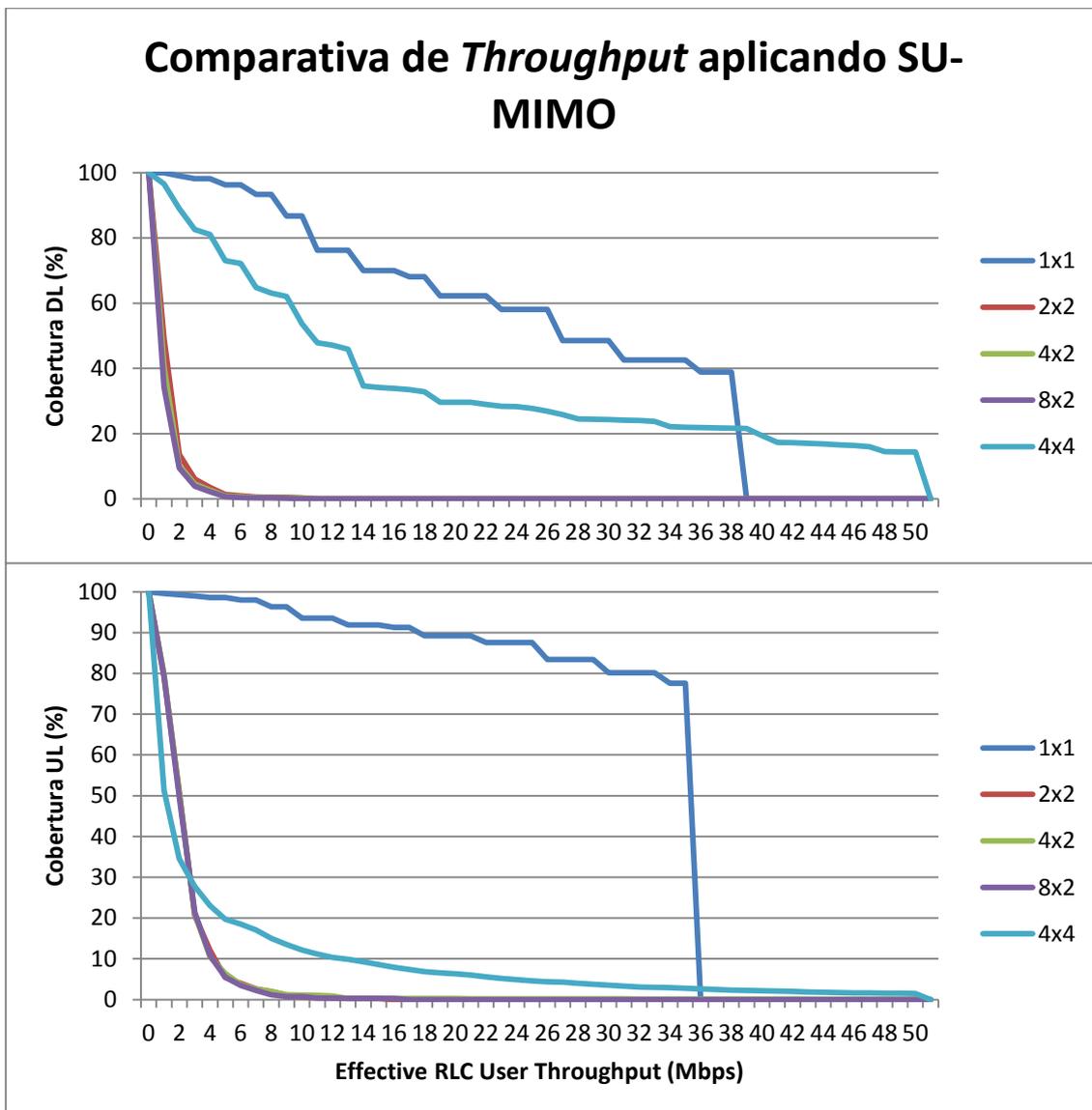


Figura 44. Comparativa del *Effective RLC User Throughput* para la técnica de SU.

En la Figura 44 se muestran los resultados de aplicar la predicción de *Coverage by Throughput* realizado para las diferentes configuraciones de antenas para la técnica de SU de MIMO. En este caso los resultados son prácticamente idénticos a los obtenidos al realizar la misma predicción cambiando la configuración. Asimismo, la única técnica que responde más o menos con una cierta garantía es la de 4x4.

- Aplicando la técnica de AMS se obtienen los siguientes resultados:

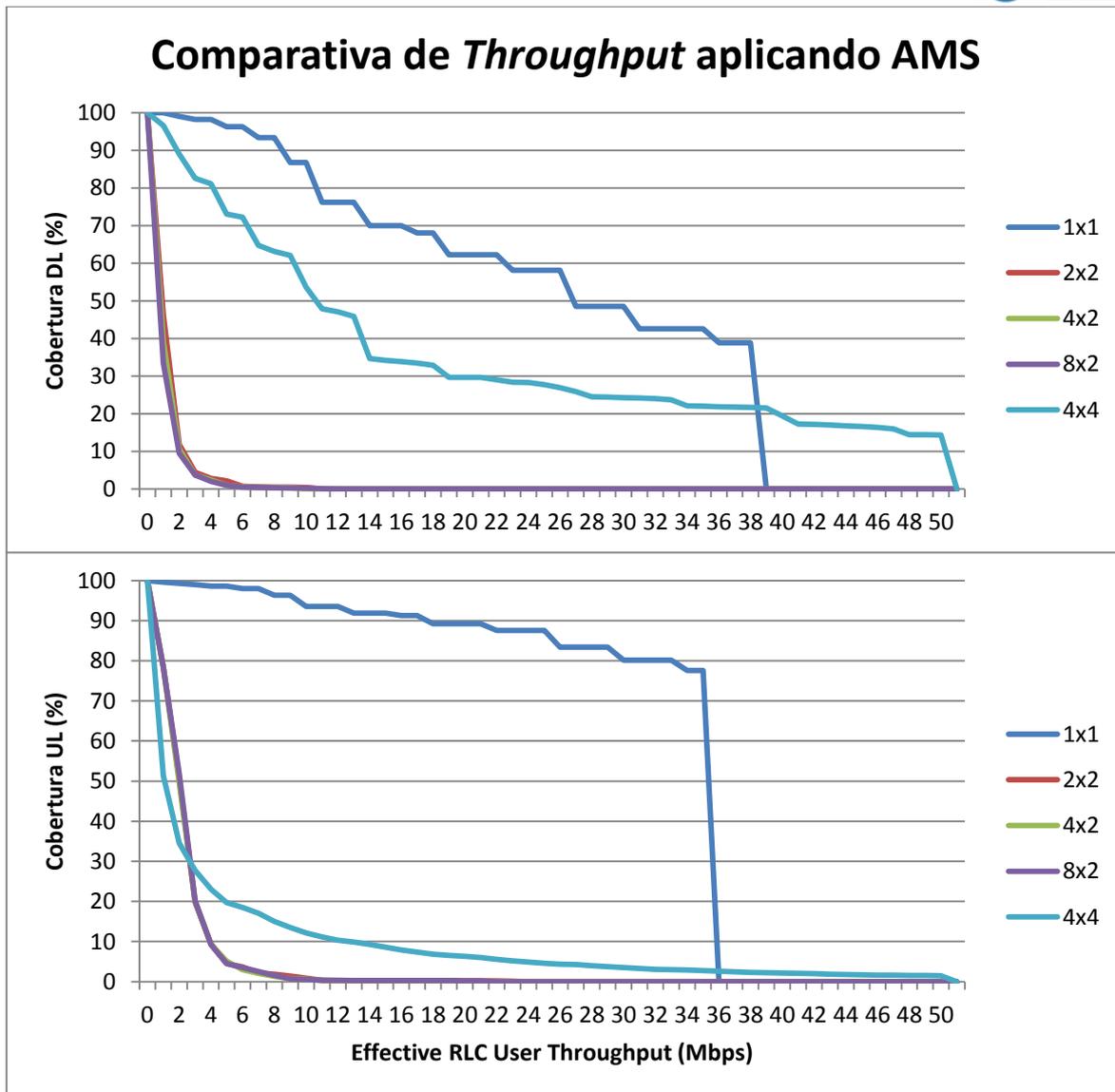


Figura 45. Comparativa del *Effective RLC User Throughput* para la técnica de AMS.

En la Figura 45 puede observarse como los resultados son idénticos a los de las predicciones previamente calculadas. Esto es razonable ya que la técnica AMS (*Adaptive MIMO Switching*) lo que hace es conmutar las técnicas de SU y Diversidad en función del estado de la relación señal a ruido del canal, como se ha comentado en el apartado anterior. Con lo cual era imposible que si los resultados para Diversidad y SU eran parecidos, los de AMS también saldrían similares.

5.4.1.4. Comparativa de $C/(I+N)$ con las diferentes técnicas de MIMO

En este apartado se va a comparar la calidad de la señal en términos de $C/(I+N)$ para las diferentes técnicas MIMO. Como en el caso anterior con el *Throughput*, se ha escogido las simulaciones correspondientes a las diferentes configuraciones multiantena correspondientes con un *scaling factor* igual a 3, en la configuración 2x2. Los resultados obtenidos son los siguientes:

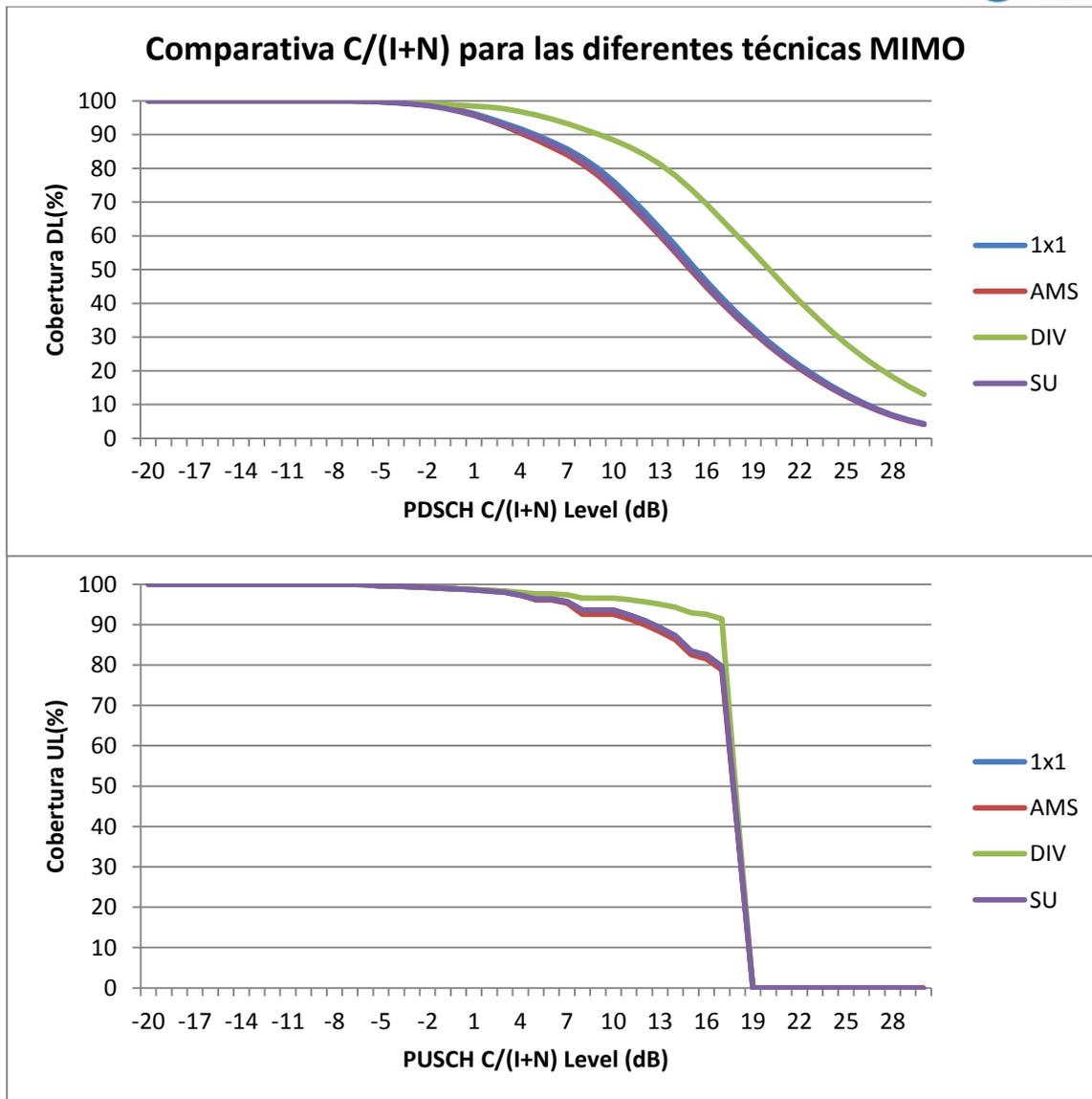


Figura 46. Comparativa de los diferentes niveles de $C/(I+N)$ para las diferentes técnicas MIMO.

En la Figura 46 se muestran los resultados obtenidos de realizar la predicción *Coverage by C/(I+N)* sobre ambos enlaces. Esta predicción muestra los niveles del PDSCH para el enlace descendente y el de PUSCH para el caso del enlace ascendente. Como se puede apreciar en la figura en ambos enlaces ocurre lo mismo. Para el caso de SISO (configuración de 1x1), AMS y SU se obtiene el mismo nivel de señal para el caso de *scaling factor* igual a 3 y una configuración de 2x2, pero si se observa en el caso de la técnica de Diversidad, el nivel de cobertura mejora. Este resultado era previsible si se observa el comportamiento de esta técnica al aplicar la predicción de *Throughput* del apartado anterior. Tal y como está definido la técnica de diversidad, se obtiene un mejor nivel de cobertura al transmitir-recibir mensajes por varios canales, que en cambio si se utiliza AMS o SU, que lo que mejora es la calidad del enlace, ofreciendo más velocidad, pero no más cobertura.

5.4.2. Efecto de técnicas MIMO para los diferentes servicios

En este apartado se va a proceder al estudio de cómo afectan las diferentes técnicas MIMO para los diferentes servicios definidos. El estudio va a ser diferente de los casos anteriores, ya que no se quiere estudiar la velocidad. En este caso se desea garantizar que los diferentes servicios se satisfacen de una manera correcta. Para ello se va a exponer los diferentes servicios definidos en el sistema y su configuración.

	FTP Download	Web Browsing	Video Conferencing	VoIP
Type	Data	Data	Voice	Voice
Average requested throughput (DL)	256 kbps	64 kbps	64 kbps	12,2 kbps
Average requested throughput (UL)	32 kbps	32 kbps	64 kbps	12,2 kbps
Max throughput demand (DL)	1024 kbps	256 kbps	128 kbps	24,4 kbps
Max throughput demand (UL)	128 kbps	128 kbps	128 kbps	24,4 kbps
Min throughput demand (DL)	10 kbps	64 kbps	64 kbps	12,2 kbps
Min throughput demand (UL)	10 kbps	32 kbps	64 kbps	12,2 kbps

Tabla 18. Resumen de parámetros de los servicios de la red LTE.

Ahora que se han recordado los servicios, se va a analizar, servicio a servicio, si se cumple con la configuración expuesta en la Tabla 18. Para ello, se utilizarán los datos obtenidos de una de las simulaciones realizadas anteriormente, específicamente la del caso *Scaling Factor* = 3 y una tecnología MIMO en el caso 2x2, dos antenas de transmisión y dos antena de recepción, que ha sido el caso más favorable estudiado al aplicar la tecnología. Para cada servicio se va a realizar un estudio análogo, primero se calcularán las estadísticas de la simulación por servicio para las tres tecnologías diferentes de MIMO y luego se analizará si los resultados obtenidos satisfacen las necesidades de los usuarios. Las estadísticas de los diferentes servicios son los siguientes:

		SU 2x1	DIV 2x1	AMS 2x1
FTP Download	Users	94	111	85
	Connected DL	39	52	37
	Connected UL	55	58	48
	Connected DL+UL	0	1	0
	Inactive	0	0	0
Video Conferencing	Users	60	66	60
	Connected DL	11	18	14
	Connected UL	17	16	18
	Connected DL+UL	16	13	12
	Inactive	16	19	16
VoIP	Users	1040	1054	1045
	Connected DL	252	263	266
	Connected UL	249	234	259
	Connected DL+UL	379	380	366
	Inactive	160	177	154
Web Browsing	Users	1551	1601	1642
	Connected DL	1183	1237	1232
	Connected UL	366	356	405
	Connected DL+UL	2	8	4
	Inactive	0	0	0

Tabla 19. Descripción de los diferentes servicios para las diferentes tecnologías de MIMO con una simulación de *scaling factor* = 3.

Se puede apreciar en la Tabla 19 que los resultados obtenidos se asemejan con bastante similitud a los obtenidos en la Tabla 16. En rasgos generales los resultados obtenidos aplicando las diferentes tecnologías MIMO se asemejan bastante. Lo que sí que se aprecia con claridad es el volumen de usuarios de *VoIP* y *Web Browsing* respecto a los de *FTP Download* y *Video Conferencing*. Esta consecuencia se puede justificar de la siguiente manera. Los *Business User's* tienen definidos todos los servicios mientras que los *Standard User's* solamente tienen definidos *VoIP* y *Web Browsing*. Al hacer la simulación se han repartido los tipos de usuarios según corresponde con el mapa de tráfico. Lo que sí podemos decir es que los servicios que requiere optimizar y comprobar que funcionan de forma correcta son estos últimos, ya que son los que tienen más demandada. A continuación se puede comprobar para los diferentes servicios la calidad del enlace.

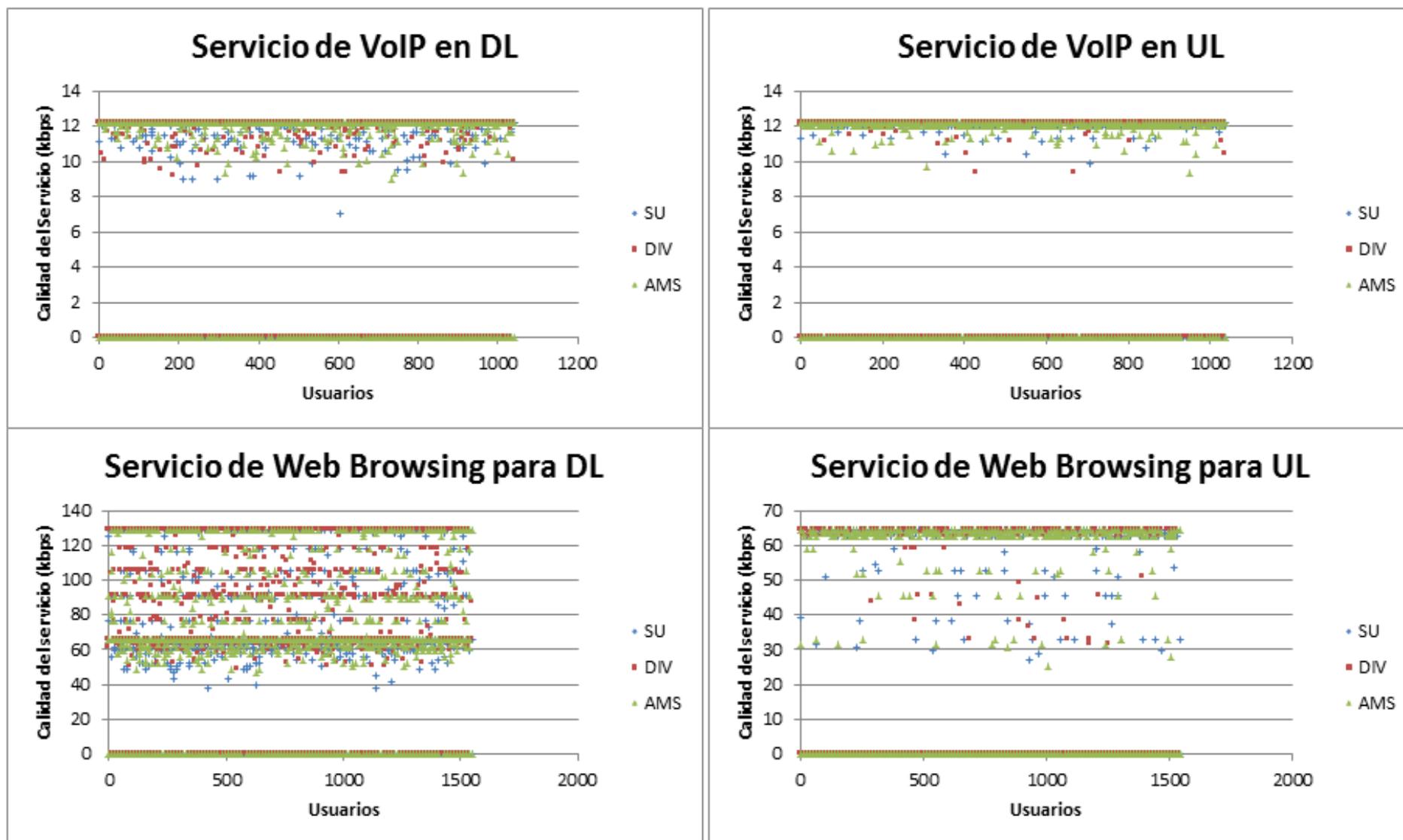


Figura 47. Descripción de la calidad de los servicios de VoIP y Web Browsing para el DL y UL.

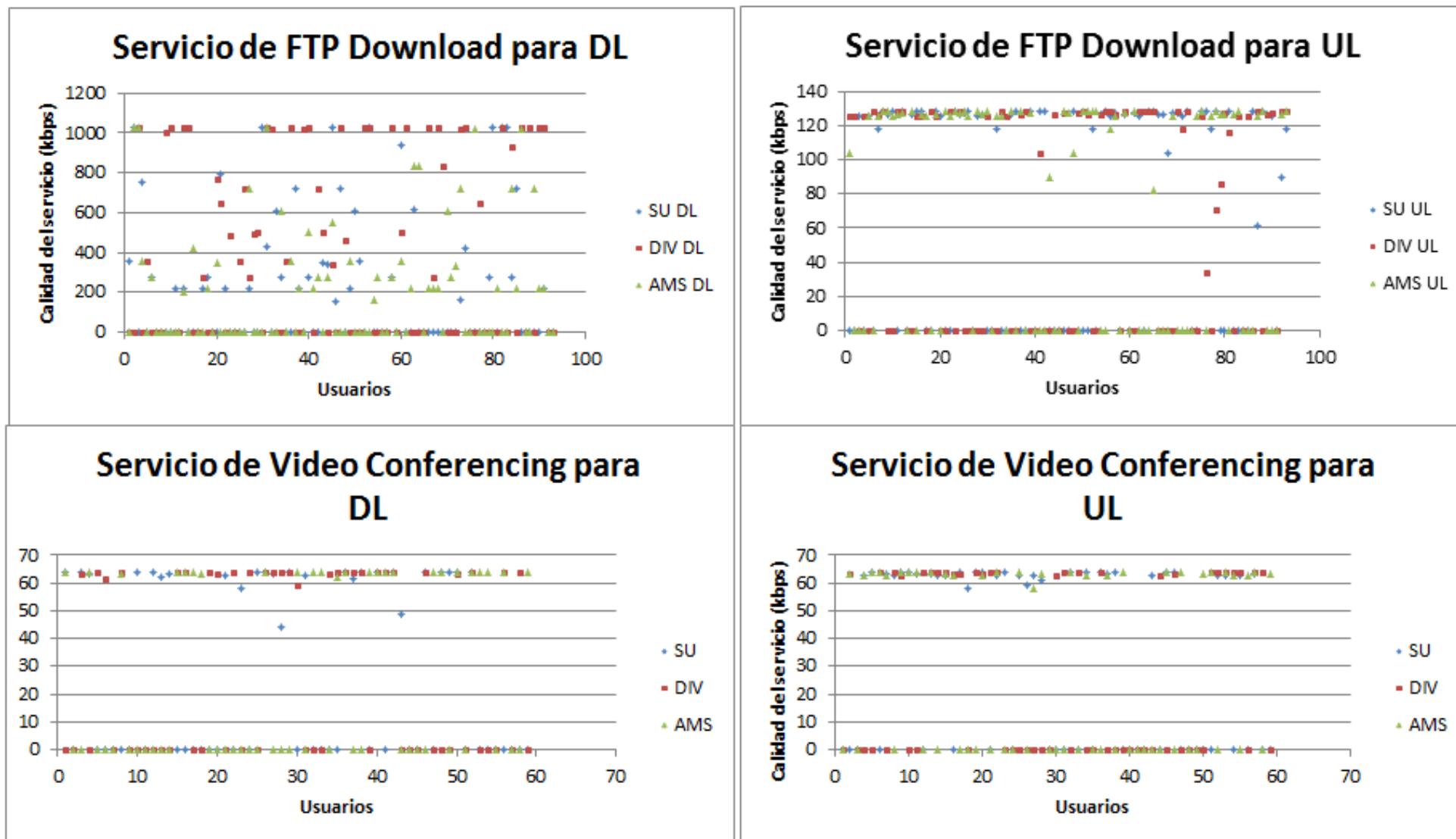


Figura 48. Descripción de la calidad de los servicios de FTP Download y Video Conferencing para el DL y UL.

En líneas generales, una vez observadas las tablas se puede comprobar que si la red permite servicio al usuario se le garantizará una buena cobertura. En primer lugar en la gráfica de *VoIP* se observa como todos los usuarios se encuentran en el intervalo final de 10 a 12 kbps. Esto ocurre tanto en el enlace ascendente como en el descendente, aunque sí que hay que señalar que en el descendente existen más casos que se encuentran repartidos por este intervalo. Solamente hay una excepción de todos los usuarios conectados que no se encuentra en ese intervalo. Así que se puede asegurar que en el caso de que el usuario esté activo en *VoIP* se le garantizará buena capacidad para ambos enlaces.

En segundo lugar está la representación de la calidad de la capacidad del servicio de *Web Browsing*. Señalar que existe una diferencia evidente respecto a los dos enlaces. Esta diferencia se podría suponer con lo visto en las figuras representativas del *Throughput*, donde se puede apreciar que existe una mejor cobertura para dar servicio en el enlace ascendente que en el descendente. En el enlace ascendente se puede comprobar cómo los usuarios se mueven entre los 32 kbps y 64 kbps, donde se encuentran el mínimo y el máximo de velocidad definida para el servicio de *Web Browsing*. No ocurre así en el enlace descendente. El enlace descendente tiene un máximo de 128 kbps y un mínimo de 32 kbps. Se puede apreciar que la mayoría sí que se encuentra en ese rango, pero existe un 15,48% de usuarios que se encuentran por debajo de los 64 kbps, para los cuales el servicio será deficiente.

En el caso de estudiar el servicio para *FTP Download* cabe la pena destacar que para la poca densidad de usuarios que hay, se da la circunstancia de que todos los usuarios activos se encuentran por encima del mínimo de 10 kbps para garantizar un buen servicio y que un 7,93% son los que llegan a conseguir el máximo *Throughput* (10 Mbps) a la hora de realizar el servicio. En el caso del enlace ascendente se puede decir que prácticamente el 100% de los usuarios conectados gozan del máximo de cobertura, garantizándose así una gran capacidad.

Ya por último, en el caso que los usuarios se encuentren operando con el servicio de *Video Conferencing* se observa que funciona prácticamente garantizando una calidad del 100% a los usuarios que se encuentren conectados a este servicio para ambos enlaces. El máximo y el mínimo definido para el servicio de es de 64 kbps que se cumple salvo para algunos pocos casos.

6. Conclusiones y Líneas Futuras

La primera tarea que requiere un operador de telefonía para instalar una red nueva es la de realizar un plan nominal. Este ha sido el objetivo de este proyecto final de carrera. Mediante el uso de la herramienta ATOLL se ha simulado el diseño de una red y se ha estudiado el impacto que supondría instalar un sistema de cuarta generación (4G) en un entorno urbano, mediante la realización de un plan nominal. LTE es un sistema que cuyas principales ventajas sobre su predecesor son: reducir las latencias, aumentar la velocidad y tener una canalización variable para potenciar su capacidad a la hora de realizar un servicio de envío de datos, tanto para *uplink* como para *downlink*, sin perder calidad en el servicio de voz. También cabe desatacar que puede operar en varias bandas.

El objetivo final de este plan nominal es el de presentar el diseño de una red lo más optimizada posible que garantice un buen servicio a sus potenciales usuarios. Las fases que se ha seguido para llevar a cabo esta optimización son las siguientes. En primer lugar se han realizado unas predicciones para medir si los diferentes transmisores instalados daban cobertura a cada píxel del mapa, considerando cada píxel como un posible usuario. En segundo lugar se han realizado otras predicciones, ya dependiendo de un mapa de tráfico, con la que se ha conseguido una aproximación más precisa de la necesidad de recursos en zonas donde la densidad de usuarios es más elevada.

En el primer caso, se realizan las predicciones que no dependen del mapa de tráfico (*Coverage by Transmitter, Overlapping Zones y Signal Level*) para poder comprobar que la red abarca la extensión de la zona urbana que queremos estudiar, se ha realizado la predicción *Coverage by Transmitter*. Más tarde, cuando se comprueba que cada píxel del mapa está cubierto realizamos las otras dos predicciones. La primera, *Coverage by Overlapping Zones*, ha mostrado qué transmisores están dando un servicio de forma solapada. La segunda, *Coverage by Signal Level*, nos ha mostrado los diferentes niveles de señal. Aquí se ha llevado a cabo la primera optimización, desconectando aquellos transmisores redundantes y recolocando dos estaciones base para poder ofrecer un mejor servicio.

En el segundo caso se ha considerado un mapa de tráfico. Para llevar a cabo las predicciones ha sido necesario realizar un grupo de simulaciones que intenten representar el comportamiento de la red en un momento dado considerando densidades diferentes, variando el *scaling factor*. Una vez realizadas estas simulaciones se han realizado otro grupo de predicciones (*Coverage by C/(I+N)*) donde se ha evaluado la calidad de la señal respecto al ruido. Ya que en este caso se ha visto que en la zona de la diagonal (*Dense Urban*) no se garantizaba un buen servicio se han incluido dos estaciones base que puedan garantizar un mínimo de calidad.

Una vez realizada la tarea de la optimización se ha procedido a analizar la calidad de la red. Para ello se han realizado un grupo de predicciones (*Coverage by C/(I+N)* y *Coverage by Throughput*) teniendo en cuenta las diferentes simulaciones que se han mencionado. Para los dos tipos de predicciones se han observado unos resultados similares. A medida que se aumentaba la densidad de usuarios, la calidad del enlace se iba perdiendo, tanto para *C/(I+N)* como para el *Throughput*. Es una consecuencia lógica ya que al aumentar los usuarios la red estará más demandada de recursos y llegará un punto que no podrá ofrecer más servicios, provocando que usuarios pasen a estar inactivos, como se ha podido comprobar en la tabla donde se desglosaba el estado de los usuarios según *scaling factor*, donde la mayor causa de usuarios inactivos era la falta de recursos.

Posteriormente, se ha realizado el mismo estudio comparando diferentes técnicas MIMO. Se ha llevado a cabo un estudio de dos etapas. La primera ha sido comprobar que efecto tiene aplicar técnicas MIMO a nivel celular para luego posteriormente comprobar que efecto tiene a nivel de usuario. Los resultados obtenidos al aplicar las técnicas de MIMO en la red intentan reflejar el rendimiento de la red una vez se utilizan las técnicas de multiplexación para antenas.

En el primer caso, a nivel de celda, se han realizado las predicciones de *Coverage by Throughput*, estudiando los diferentes resultados que ofrece MIMO, y luego, el *Coverage by C/(I+N)* para evaluar la relación señal a ruido más interferentes. Uno de los puntos fuertes de aplicar el estándar LTE es el uso de las técnicas MIMO. Se ha podido comprobar en este proyecto el rendimiento que supone el uso de las diferentes técnicas MIMO para un caso concreto. Las consideraciones se han tomado evaluando dos variables: el nivel de cobertura y el *Throughput* de la celda, realizando las predicciones calculando el *Effective RLC Channel Throughput*. Según la técnica MIMO utilizada los objetivos son diferentes, en el caso de escoger Diversidad, se busca dar un mayor nivel de cobertura, no como SU, que lo que se busca es aumentar la velocidad del enlace. En este caso se agrupa la técnica de AMS con la de SU ya que las condiciones del canal son muy favorables. Como operadora, el objetivo es conseguir dar el mejor servicio al máximo de zona de cobertura. Según los resultados analizados en este proyecto, se obtienen dos vías diferentes de actuación. En la primera, al utilizar Diversidad se aumenta la cobertura dando un mejor servicio global a los usuarios de la celda, en cambio, por esta segunda vía, si se utiliza AMS o SU, se aumenta la velocidad de aquellos que presentan mejor relación señal a ruido, que serán los que estén cerca de las antenas. Evaluando los diferentes resultados, sería más conveniente aplicar la técnica de Diversidad, ya que garantiza un mejor nivel de cobertura global, aunque no se lleguen a picos de velocidades de 50 Mbps, casi siempre garantiza los 38 Mbps.

En un segundo caso se ha evaluado el *Effective RLC User Throughput* para evaluar el nivel de cobertura del *Throughput* a nivel usuario. En este caso los resultados reflejan una clara disminución de la cobertura, salvo en el caso de que la configuración sea la de 4x4. Esta disminución en la cobertura viene ocasionada por un factor muy limitante, que son las señales interferentes de los vecinos. A la hora de realizar el cálculo del *Effective RLC User Throughput* para ambos enlaces, las numerosas señales interferentes de los vecinos ocasionan una reducción considerable de la capacidad obtenida. Como se ha comentado, esto solamente ocurre cuando en recepción tenemos 2 antenas, en el caso de que se doblaran a cuatro las antenas en recepción, se obtendría un cierto nivel de cobertura, pero insuficiente para considerar una mejora en el servicio al utilizar MIMO.

Ya para finalizar el estudio, se ha evaluado la capacidad de los diferentes servicios que se ofrecen en el sistema. Se ha podido comprobar que existen dos servicios con una alta

demanda (*VoIP* y *Web Browsing*) donde la red, para un usuario que se encuentra activo para cada servicio responde garantizando buena calidad para el primero, y para un 83% de los casos del segundo caso. Para los otros dos servicios estudiados (*Video Conferencing* y *FTP Download*) se ha podido ver que en el caso de que un usuario se encuentre realizando ese servicio, al ser una densidad tan baja de usuario, la red responde sin problemas, garantizando una buena calidad en ese servicio.

Una vez se han considerado las conclusiones, aspectos que se podrían mejorar en posteriores proyectos podrían ser los siguientes. En primer lugar, se podría realizar el plan nominal considerando la evolución temporal de los terminales. Ya se ha comentado que las simulaciones son solamente un instante determinado, sin considerar la escala temporal, sería interesante ver si en el transcurso de una conexión de descarga de datos o de un llamada, el volumen de tráfico provocaría la desconexión, por ejemplo. Otro aspecto que sería interesante estudiar es probar a realizar el estudio aprovechando la canalización variable según el tráfico que dispone el sistema LTE. En este proyecto se ha considerado un ancho de banda de 10 MHz, podría ser una posibilidad ver qué ocurriría con los diferentes usuarios inactivos si tuviéramos una canalización de 20 MHz. Otro de las posibles líneas futuras de investigación sería la realización del plan nominal teniendo en consideración diferentes tipos de movilidad, como se ha comentado, en este proyecto solamente se ha considerado la movilidad tipo *Pedestrian*, sería interesante comprobar los resultados si se aplicaran otros tipos de movilidad, como los usuarios del sistema localizados en metro, coches o autobuses. Ya como última sugerencia sería la realización del estudio considerando todos los posibles *schedulers*. En este caso se ha escogido *Round Robin*, que reparte de manera justa recursos a todos los usuarios, sería interesante comprobar si otra estrategia sería más justa si beneficiara a los usuarios más lejos de la antena, que necesiten más recursos, aunque es una elección que también depende del operador.

7. Referencias

- [1] ITU. (2011). *ICT Facts and Figures*. Retrieved 13, 2012, from ITU World Telecommunication: <http://www.itu.int/ITU-D/ict/facts/2011/material/ICTFactsFigures2011.pdf>
- [2] Farley, T. (2005). Mobile Telephone History. *Telektronikk*, 3 (4), 22-34.
- [3] AT&T. (n.d.). *Technology Timeline. 1946: First Mobile Telephone Call*. Retrieved Noviembre 22, 2011, from AT&T Corporation Web site: <http://www.corp.att.com/attlabs/reputation/timeline/46mobile.html>
- [4] Gorricho, M., & Gorricho, J. L. (2002). *Comunicaciones móviles*. Barcelona: Edicions UPC.
- [5] Tecuanhuehue, J. (2006, febrero 1). *Sistemas CDMA: cdmaOne, cdma2000*. Cholula, Puebla, México.
- [6] Sallent, O., Valenzuela, J. L., & Agustí, R. (2003). *Principios de comunicaciones móviles*. Barcelona: Edicions UPC.
- [7] Frenkiel, R. (n.d.). A Brief History of Mobile Communications.
- [8] Korhonen, J. (2003). *Introduction to 3G Mobile Communications*. Norwood: Artech House, Inc.
- [9] Prasad, R., & Ruggieri, M. (2003). *Technology Trends in Wireless Communications*. Boston: Artech House.
- [10] Walke, B., Seidenberg, P., & Althoff, M. P. (2003). *UMTS. The Fundamentals*. Chichester: Wiley.
- [11] Stuckmann, P. (2003). *The GSM Evolution: Mobile Packet Data Services*. Chichester: Wiley.
- [12] Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J., & Beming, P. (2007). *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*. San Diego: Academic Press.
- [13] Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2009). *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Chichester: Wiley.
- [14] Agusti, R., Bernardo, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez, J., & Sallent, O. (2010). *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. Barcelona: Fundación Vodafone España.
- [15] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, Per Beming "3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband" Editorial: Academic Press, 2008.
- [16] Harri Holma, Antti Toskala, "LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access" Editorial: Wiley & Sons, 2009.
- [17] Forsk. (2011). *Technical Reference Guide version 3.1.2*.
- [18] Forsk. (2011). *Atoll User Manual Radio version 3.1.2*.
- [19] Alexandre Piexoto (2012), "LTE: An overview. High level considerations on practical implementation"
- [20] Chhaya Dalela, P. K. Dalela, "Tuning of Cost-231 Hata Model for radio wave propagations predictions"

Anexo 1. Bandas LTE

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit		Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive		Duplex Mode
	F _{UL_low}	F _{UL_high}	F _{DL_low}	F _{DL_high}	
1	1920 MHz	1980 MHz	2110 MHz	2170 MHz	FDD
2	1850 MHz	1910 MHz	1930 MHz	1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	1785 MHz	1805 MHz	1880 MHz	FDD
4	1710 MHz	1755 MHz	2110 MHz	2155 MHz	FDD
5	824 MHz	849 MHz	869 MHz	894 MHz	FDD
6 ¹	830 MHz	840 MHz	875 MHz	885 MHz	FDD
7	2500 MHz	2570 MHz	2620 MHz	2690 MHz	FDD
8	880 MHz	915 MHz	925 MHz	960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	1784.9 MHz	1844.9 MHz	1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz	1770 MHz	2110 MHz	2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	1447.9 MHz	1475.9 MHz	1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz	716 MHz	729 MHz	746 MHz	FDD
13	777 MHz	787 MHz	746 MHz	756 MHz	FDD
14	788 MHz	798 MHz	758 MHz	768 MHz	FDD
15	Reserved		Reserved		FDD
16	Reserved		Reserved		FDD
17	704 MHz	716 MHz	734 MHz	746 MHz	FDD
18	815 MHz	830 MHz	860 MHz	875 MHz	FDD
19	830 MHz	845 MHz	875 MHz	890 MHz	FDD
20	832 MHz	862 MHz	791 MHz	821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz	1462.9 MHz	1495.9 MHz	1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz	3490 MHz	3510 MHz	3590 MHz	FDD
23	2000 MHz	2020 MHz	2180 MHz	2200 MHz	FDD
24	1626.5 MHz	1660.5 MHz	1525 MHz	1559 MHz	FDD
25	1850 MHz	1915 MHz	1930 MHz	1995 MHz	FDD
26	814 MHz	849 MHz	859 MHz	894 MHz	FDD
27	807 MHz	824 MHz	852 MHz	869 MHz	FDD
28	703 MHz	748 MHz	758 MHz	803 MHz	FDD
29	N/A		717 MHz	728 MHz	FDD ²
...					
33	1900 MHz	1920 MHz	1900 MHz	1920 MHz	TDD
34	2010 MHz	2025 MHz	2010 MHz	2025 MHz	TDD
35	1850 MHz	1910 MHz	1850 MHz	1910 MHz	TDD
36	1930 MHz	1990 MHz	1930 MHz	1990 MHz	TDD
37	1910 MHz	1930 MHz	1910 MHz	1930 MHz	TDD
38	2570 MHz	2620 MHz	2570 MHz	2620 MHz	TDD
39	1880 MHz	1920 MHz	1880 MHz	1920 MHz	TDD
40	2300 MHz	2400 MHz	2300 MHz	2400 MHz	TDD
41	2496 MHz	2690 MHz	2496 MHz	2690 MHz	TDD
42	3400 MHz	3600 MHz	3400 MHz	3600 MHz	TDD
43	3600 MHz	3800 MHz	3600 MHz	3800 MHz	TDD
44	703 MHz	803 MHz	703 MHz	803 MHz	TDD

NOTE 1: Band 6 is not applicable
NOTE 2: Restricted to E-UTRA operation when carrier aggregation is configured. The downlink operating band is paired with the uplink operating band (external) of the carrier aggregation configuration that is supporting the configured Pcell.

Figura 49. Listado de Bandas de LTE.