

# Diseño y simulación de una red 4G en pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia



**Marcos Garcerán Almagro**

Grado de Ingeniería de  
Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación  
Redes Inalámbricas

**Nombre Tutor/a de TF**

Ferran Adelantado Freixer

**Profesor/a responsable de  
la asignatura**

Ferran Adelantado Freixer

Universitat Oberta  
de Catalunya

**22 de enero de 2023**



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](#)

**FICHA DEL TRABAJO FINAL**

<b>Título del trabajo:</b>	<i>Diseño y simulación de una red 4G en pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia</i>
<b>Nombre del autor:</b>	<i>Marcos Garcerán Almagro</i>
<b>Nombre del consultor/a:</b>	<i>Ferran Adelantado Freixer</i>
<b>Nombre del PRA:</b>	<i>Ferran Adelantado Freixer</i>
<b>Fecha de entrega (mm/aaaa):</b>	<i>01/2023</i>
<b>Titulación o programa:</b>	<i>Grado de Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación</i>
<b>Área del Trabajo Final:</b>	<i>Redes Inalámbricas</i>
<b>Idioma del trabajo:</b>	<i>Castellano</i>
	<i>Palabras clave</i>

**Resumen del Trabajo**

Actualmente son millones de usuarios los que tienen acceso a internet de alta velocidad mediante ADSL o fibra óptica desde prácticamente cualquier punto de España. Sin embargo, en aquellas zonas en las que el despliegue de cable es complicado, se opta por tecnologías inalámbricas como el 4G.

4G es la cuarta generación de tecnologías de telefonía móvil cuyo objetivo general es proporcionar una comunicación móvil más segura y completa con una velocidad de transferencia que teóricamente puede alcanzar hasta 1 Gbit/s. Las redes 4G se basan completamente en el protocolo de comunicación IP (*Internet Protocol*).

El objetivo de este proyecto es, por un lado explicar las características más relevantes del 4G como estudio de esta tecnología. Y por otro lado, llevarla a la práctica, diseñando una red y simulando su cobertura en un escenario real.

Por último, al final del proyecto se realizará un análisis económico que junto a los resultados obtenidos tras la simulación nos ayudará a sacar conclusiones sobre la viabilidad de la red planteada.

**Abstract**

Nowadays, there are millions of users with access to high speed internet using ADSL or fiber optic from almost everywhere in Spain. However, in those areas where it is difficult to install a wired network, other technologies are used, such as 4G.

4G is the fourth generation of broadband cellular network technology. Its most

relevant objectives are to provide a safer mobile communication as well as a transferring speed that theoretically can reach up to 1 Gbit/s. 4G networks are based on the IP (Internet Protocol) communication protocol.

The objective of this project is, on the one hand, to explain the most important aspects of 4G as an introduction to this technology and, on the other hand, to put it in a real scenario: designing a network and simulating its coverage in a specific location.

Ultimately, at the end of the project we will see an economic analysis that, together with the obtained results, will help us to decide the viability of the mentioned network.

# Índice

<b>1. Introducción.....</b>	7
1.1. Contexto y justificación del trabajo .....	7
1.2. Objetivos del trabajo.....	8
1.3. Planificación del trabajo .....	9
1.4. Breve sumario de productos obtenidos .....	10
1.5. Breve descripción de los otros capítulos de la memoria .....	10
<b>2. Estudio de la tecnología 4G .....</b>	11
2.1. Evolución telefonía móvil.....	11
2.2. Definición de la tecnología 4G.....	14
2.3. Estándar de telefonía móvil 4G .....	15
2.4. Funcionamiento del 4G .....	15
2.5. Principales características técnicas.....	16
2.6. LTE vs LTE-A .....	16
2.7. Arquitectura de una red 4G .....	17
2.9. Capa física: Interfaz radio.....	19
2.9.1. Modulaciones .....	19
2.9.2. Escalabilidad de ancho de banda.....	20
2.9.3. Técnicas de acceso al medio .....	20
2.9.4. MIMO .....	22
<b>3. Diseño red 4G .....</b>	23
3.1. Introducción .....	23
3.2. LTE en la Región de Murcia .....	24
3.3. Elección de la zona geográfica donde implementar la red .....	25
3.4. Objetivo: Diseño de una red 4G en las pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia .....	26
3.4.1. Calidad de servicio .....	26
3.4.2. Modelos de propagación .....	27
3.4.3. Celdas en telefonía móvil .....	30
3.5. <i>Xirio Online</i> .....	31
3.6. Análisis de requerimientos de una red .....	32
3.7. Estudio de requerimientos de la red 4G a diseñar .....	33
3.7.1. Bandas de frecuencia.....	33
3.7.2. Estudio del tráfico demandado por los usuarios de la red .....	34
3.7.3. Estudio de la capacidad de un eNodeB típico .....	35
3.7.5. Número de eNodeBs.....	43
3.8. Estudio de la ubicación óptima de los eNodeBs.....	63
3.8.1. Estudio de la orografía .....	63
3.8.2. Ubicación basada en el uso del modelo de propagación de Okumura - Hata .....	66
3.9. Backhaul inalámbrico .....	69
3.10. Descripción de la solución de red 4G propuesta .....	70
<b>4. Simulación de la red 4G propuesta en <i>Xirio Online</i> .....</b>	72
4.1. Estudio de la cobertura.....	72
4.2. Estudio de los enlaces.....	79
<b>5. Presupuesto .....</b>	83
<b>6. Conclusiones y líneas futuras .....</b>	85
<b>7. Glosario .....</b>	87
<b>8. Bibliografía.....</b>	89

## Ilustraciones

Ilustración 1. Para qué utilizó la gente Internet en 2020 [1].....	7
Ilustración 2. Mapa de cobertura 4G en España en 2021 [2]. .....	8
Ilustración 3. PEC1 Diagrama de Gantt .....	9
Ilustración 4. PEC2 Diagrama de Gantt .....	9
Ilustración 5. PEC3 Diagrama de Gantt .....	9
Ilustración 6. PEC4 Diagrama de Gantt .....	9
Ilustración 7. PEC5 Diagrama de Gantt .....	10
Ilustración 8. Diagrama de Gantt de las 5 fases a desarrollar.....	10
Ilustración 9. Cobertura poblacional por plataforma [6].....	14
Ilustración 10. Arquitectura a nivel básico de una red 4G [12]. .....	19
Ilustración 11. Acceso múltiples usuarios [14].....	21
Ilustración 12. Transmisor y receptor SC-FC (Single Carrier Frequency Domain) [15]. .....	22
Ilustración 13. Número de estaciones base LTE por provincias [17].....	24
Ilustración 14. Mapa pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia obtenido con el modo satélite de <i>Google Maps</i> .....	25
Ilustración 15. Esquema QoS en LTE [19]. .....	27
Ilustración 16. Factores en los modelos de propagación. ....	28
Ilustración 17. Atenuación Media Relativa A(f, d) (dB) en función de la frecuencia f (MHz) [21]. .....	29
Ilustración 18. División de un territorio en celdas y antena omnidireccional situada en el centro de una celda en un área rural [23]. .....	30
Ilustración 19. Interfaz de <i>Xirio Online</i> .....	31
Ilustración 20. Códigos de colores simulación <i>Xirio Online</i> . .....	60
Ilustración 21. Cobertura en el área seleccionada con <i>Xirio Online</i> a partir de las pérdidas máximas.....	61
Ilustración 22. Cobertura del eNodeB2 con <i>Xirio Online</i> por el método de pérdidas máximas. ....	62
Ilustración 23. De izquierda a derecha: área en m <sup>2</sup> de Cañada de la Cruz, Inazares y Calar de la Santa. ....	62
Ilustración 24. Perfil orográfico entre Cañada de la Cruz e Inazares con <i>Xirio Online</i> . .....	64
Ilustración 25. Perfil orográfico entre el eNodeB1 y Calar de la Santa con <i>Xirio Online</i> . .....	64
Ilustración 26. De izquierda a derecha: perfiles orográficos entre el eNodeB1 – eNodeB2 y el eNodeB2 – Calar de la Santa, respectivamente, con <i>Xirio Online</i> . .....	65
Ilustración 27. Orografía elementos red 4G propuesta en 3D con <i>Google Earth</i> . .....	66
Ilustración 28. Cobertura total proporcionada por el sistema con Okumura – Hata con <i>Xirio Online</i> . .....	67
Ilustración 29. Cobertura del eNodeB2 proporcionada por el sistema con Okumura – Hata con <i>Xirio Online</i> . .....	68
Ilustración 30. Cobertura total proporcionada por el sistema con 2 eNodeBs y Okumura – Hata. .....	68

Ilustración 31. Esquema básico red 4G en pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia.....	70
Ilustración 32. Simulación cobertura total mediante <i>Xirio Online</i> del eNodeB1 de la red propuesta.....	73
Ilustración 33. Simulación cobertura total del eNodeB2 de la red propuesta con <i>Xirio Online</i> .....	74
Ilustración 34. Simulación cobertura total de la red propuesta con <i>Xirio Online</i> para la primera ubicación de los eNodeBs.....	74
Ilustración 35. Simulación cobertura total del eNodeB2 de la red propuesta con <i>Xirio Online</i> .....	75
Ilustración 36. Simulación cobertura total de la red propuesta con <i>Xirio Online</i> para la segunda ubicación de los eNodeBs.....	76
Ilustración 37. Perfil orográfico entre ambos eNodeBs para la segunda ubicación con <i>Xirio Online</i> .....	76
Ilustración 38. Simulación cobertura total mediante <i>Xirio Online</i> del eNodeB1 de la red propuesta.....	77
Ilustración 39. Simulación cobertura total del eNodeB2 de la red propuesta con <i>Xirio Online</i> .....	78
Ilustración 40. Simulación cobertura total de la red propuesta con <i>Xirio Online</i> para la tercera ubicación de los eNodeBs.....	78
Ilustración 41. Perfil orográfico entre los eNodeBs propuestos en este escenario.....	79
Ilustración 42. Simulación del enlace <i>backhaul</i> de la red propuesta con <i>Xirio Online</i> .....	80
Ilustración 43. Perfil orográfico entre ambas estaciones con el perfil de la señal con <i>Xirio Online</i> .....	81
Ilustración 44. Nivel de señal recibida del enlace <i>backhaul</i> .....	81

## Tablas

Tabla 1. Comparación tecnologías de telefonía móvil [4].....	14
Tabla 2. Principales características técnicas de 4G [9].....	16
Tabla 3. Breve comparativa entre LTE-A y LTE [11] .....	17
Tabla 4. Velocidad de transmisión según la actividad en línea [25] .....	35
Tabla 5. Índices de CQI [28].....	36
Tabla 6. BW total y útil.....	37
Tabla 7. Cantidad de bloques de recursos asignados a cada BW.....	37
Tabla 8. Balance del enlace ascendente para un BW = 360 kHz [26].....	40
Tabla 9. Balance del enlace descendente para un BW = 10 MHz [26].....	41
Tabla 10. Balance del enlace ascendente con variación para un BW = 10 MHz [26] .....	42
Tabla 11. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	45
Tabla 12. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	46
Tabla 13. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	47
Tabla 14. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total 16-QAM y 64-QAM.....	48

Tabla 15. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	51
Tabla 16. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	52
Tabla 17. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	53
Tabla 18. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	54
Tabla 19. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	55
Tabla 20. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	56
Tabla 21. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	57
Tabla 22. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	58
Tabla 23. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.....	59
Tabla 24. Coordenadas de la ubicación de ambos eNodeBs.....	65
Tabla 25. Valores utilizados para el emplazamiento. ....	66
Tabla 26. Configuración antena sectorial en <i>Xirio Online</i> .....	67
Tabla 27. Coordenadas de la ubicación del emplazamiento de telefonía móvil. ....	71
Tabla 28. Localización de los eNodeBs. ....	71
Tabla 29. Localización de los eNodeBs. ....	72
Tabla 30. Localización de los eNodeBs. ....	74
Tabla 31. Localización de los eNodeBs. ....	77
Tabla 32. Presupuesto de ejecución. ....	84

# 1. Introducción

En este primer capítulo se realizará una introducción del tema propuesto. En esta línea, se abordarán el contexto y justificación del trabajo, los objetivos del mismo, la planificación, un breve resumen de los productos obtenidos así como una breve descripción de los otros capítulos de la memoria.

## 1.1. Contexto y justificación del trabajo

En la actualidad, la mayoría de personas tienen acceso a Internet, sin embargo, no en todos los lugares disfrutan de una conexión de alta velocidad debido a la naturaleza del lugar y los problemas que eso conlleva al desplegar una red cableada. Esto, entre otras cosas provoca que muchas personas no tengan acceso a recursos que son muy normales en las grandes ciudades, por lo que son muchos los que se ven obligados a desplazarse a las grandes urbes. Esta situación está provocando que las tecnologías inalámbricas como el 4G sean cada vez más populares en áreas rurales, y que gracias a estas, todo el mundo pueda acceder a una serie de herramientas incluso si se encuentran alejados de la gran ciudad sin necesidad de ningún tipo de cableado, lo que a priori supone el despliegue de una red menos compleja.

En la ilustración 1, podemos ver para qué utilizó la gente Internet en 2020 en función del tipo de población (total o rural), donde se aprecia un porcentaje menor del uso de dichos servicios en zonas rurales, indicativo de la brecha existente entre aquellos usuarios con acceso a internet en zonas rurales y otras zonas.

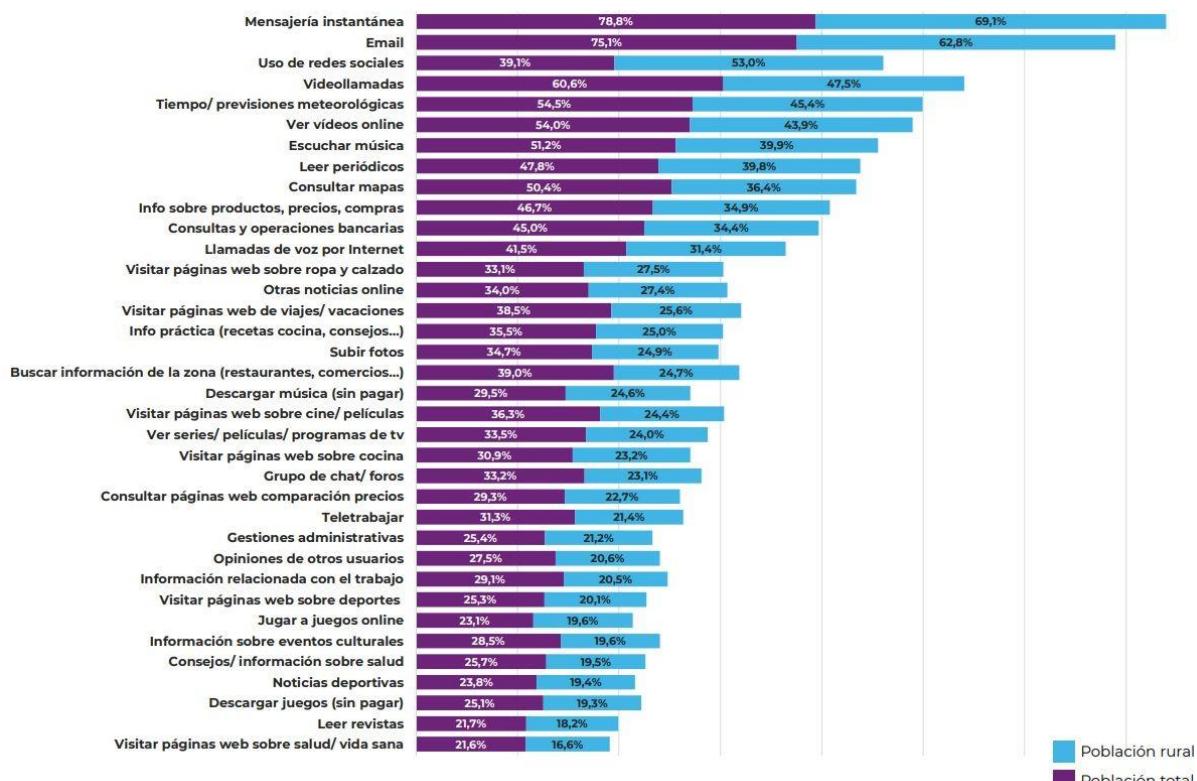


Ilustración 1. Para qué utilizó la gente Internet en 2020 [1].

Para que los habitantes de zonas rurales puedan utilizar más Internet, el despliegue de redes 4G juega un papel fundamental, además de dar acceso a multitud de herramientas y servicios.

Si prestamos atención a la cobertura 4G en España vemos que aproximadamente en el año 2021 (fecha de publicación del artículo donde aparece la Ilustración 2) prácticamente el 100% del país disponía de cobertura 4G.

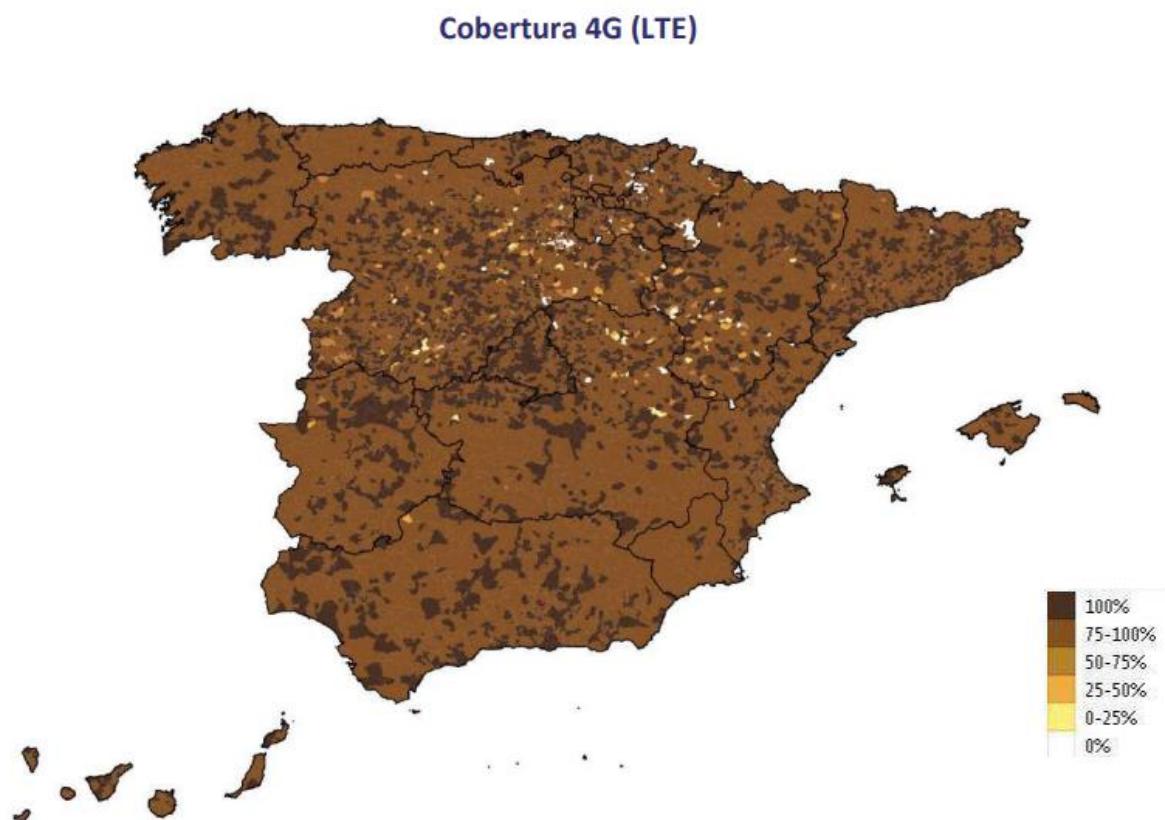


Ilustración 2. Mapa de cobertura 4G en España en 2021 [2].

A pesar de que existen desventajas con respecto al Internet cableado como su velocidad, actualmente la cuarta generación de telefonía móvil (4G) es la tecnología inalámbrica destacada en aquellas áreas rurales que disponen de infraestructuras adecuadas.

## 1.2. Objetivos del trabajo

Hoy en día, casi todo el mundo tiene acceso a internet, sin embargo existen diferencias en la calidad de conexión en función de si te encuentras en una gran ciudad o en una localidad remota.

En el peor de los casos, existen zonas rurales sin acceso a internet mientras que en el mejor de los casos sí hay cobertura pero no es tan buena como en

otras zonas más pobladas donde el despliegue de redes cableadas es más favorable.

La necesidad de llevar a estas zonas una conexión a internet mejor para que todos puedan disfrutar de los mismos servicios independientemente de su lugar de residencia es eminente. Además, frenar la despoblación en zonas rurales y liberar a las grandes ciudades de sobre población son fenómenos derivados de falta de acceso a la red en muchos casos.

Estas zonas rurales suelen estar situadas en la montaña, aisladas y su acceso suele ser difícil, además de contar con escasa población, por lo que el despliegue de una red cableada es muy costosa y no renta implantarla en la mayoría de casos.

### 1.3. Planificación del trabajo

Para realizar el trabajo se han seguido las diferentes fases mostradas en el siguiente Diagrama de Gantt:

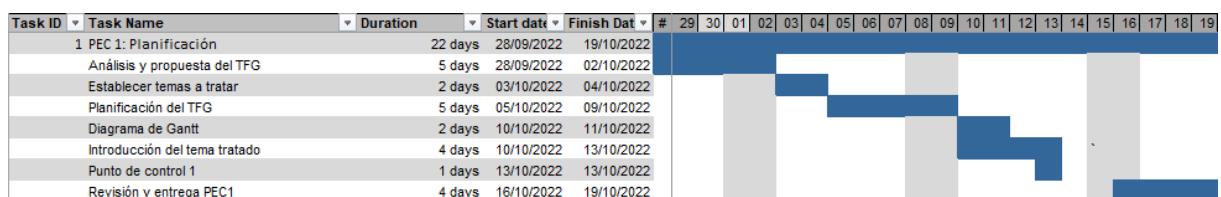


Ilustración 3. PEC1 Diagrama de Gantt.

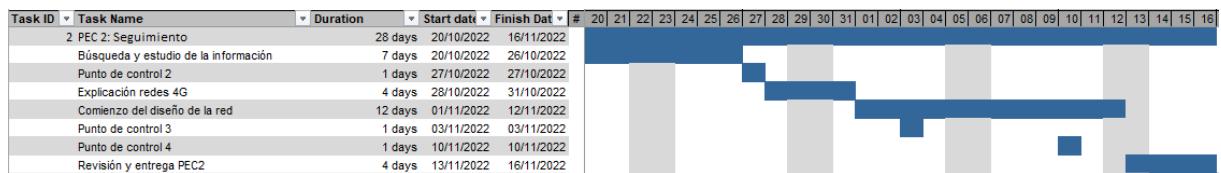


Ilustración 4. PEC2 Diagrama de Gantt.

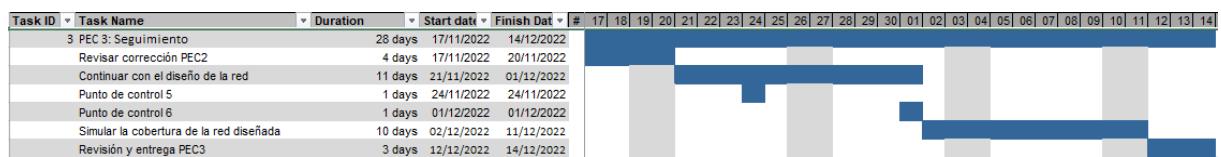


Ilustración 5. PEC3 Diagrama de Gantt.

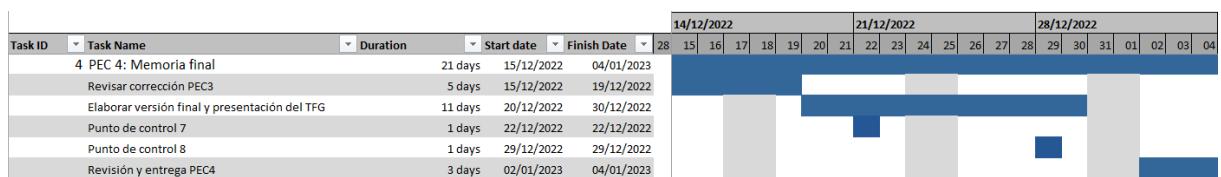


Ilustración 6. PEC4 Diagrama de Gantt.

Task ID	Task Name	Duration	Start date	Finish Date	#	23	24	25	26	27	28	29
5	PEC 5: Defensa	7 days	23/01/2023	29/01/2023								
	Defensa síncrona del TFG	1 days	Por definir	Por definir								

Ilustración 7. PEC5 Diagrama de Gantt.

#### 1.4. Breve sumario de productos obtenidos

- Informe sobre la viabilidad del despliegue de la red 4G en un área determinada.

#### 1.5. Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

El trabajo se ha dividido en 5 PECs donde la primera de ellas corresponde a la introducción, las siguientes dos a la parte principal del proyecto, la cuarta a unas conclusiones y se ha decidido añadir una quinta PEC dedicada a la defensa síncrona del TFG.

En la siguiente imagen, se muestra el diagrama de Gantt donde podemos observar las fases a desarrollar, la duración de cada una de ellas así como las fechas de inicio y de entrega.



Ilustración 8. Diagrama de Gantt de las 5 fases a desarrollar.

#### PEC 1.

En esta primera parte se hará la propuesta del TFG, el análisis, los temas a tratar y la planificación temporal de este.

Además, se realizará el capítulo 1 de la memoria del proyecto, donde se incluirán el contexto y justificación del trabajo, los objetivos del mismo, la planificación, un breve resumen de los productos obtenidos así como una breve descripción de los otros capítulos de la memoria. Finalmente, la fase 1 finaliza con la entrega de la PEC 1.

#### PEC 2.

En la segunda parte, el trabajo se centrará principalmente en la recopilación de información para estudiar dicho contenido y usarlo con el fin de elaborar el resto del proyecto. Esta PEC se recogerá en el segundo capítulo de la memoria junto con una explicación de redes 4G, el dimensionado de las necesidades de la red y parte del diseño de la red.

En esta parte, se empezará a elaborar la bibliografía, recopilando todas las fuentes consultadas para la búsqueda de información. Por otro lado, se analizarán las necesidades de cobertura así como la capacidad en cada uno de esos puntos para posteriormente comenzar con el diseño de la red en el área seleccionada. Este capítulo es principalmente teórico, aunque también tiene

una parte práctica, pero no será hasta la siguiente fase donde nos centremos realmente en dicha parte. La fase finaliza con la entrega de la PEC 2.

### **PEC 3.**

La tercera parte es en su mayoría práctica, donde se continuará con el diseño de la red 4G y se simulará la cobertura de la red en el área seleccionada con el programa *Xirio Online*. La extensión y duración de esta es similar a la de la PEC anterior.

Las principales tareas de este capítulo serán finalizar el diseño de la red iniciada en la PEC anterior y su posterior simulación de la cobertura que nos permita ver los resultados en un escenario real. Esta fase finaliza con la entrega de la PEC 3.

### **PEC 4.**

La cuarta parte podríamos considerarla como la última en lo que respecta a la elaboración del proyecto, ya que al final de esta se entregará la versión final del TFG además de la presentación que se utilizará en la defensa del proyecto.

La extensión de este capítulo es menor que las anteriores, ya que se centra en elaborar la versión final en función de las recomendaciones realizadas por el tutor, por lo que es muy importante revisar las entregas anteriores y modificarla. Finalmente, se realizará la entrega de la PEC 4.

### **PEC 5.**

Se ha decidido incluir esta quinta PEC de forma adicional de cara a la preparación de la defensa síncrona del TFG. Esta defensa se realizará un día a acordar con el tribunal y el tutor entre el 23 y 29 de Enero a través de alguna aplicación de colaboración como *Teams*, *Skype*, *Zoom* o similar.

En este último capítulo únicamente hay que preparar la defensa.

## **2. Estudio de la tecnología 4G**

### **2.1. Evolución telefonía móvil**

#### **2.1.1. Red de comunicación móvil de primera generación - 1G**

Esta primera generación utilizaba señales analógicas y tenía numerosas desventajas debido a las limitaciones tecnológicas.

Algunas de sus características son una frecuencia de 800 MHz y 900 MHz, un ancho de banda de 10 MHz, una técnica de acceso FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) o una frecuencia modulada.

Entre algunas de sus desventajas podemos destacar que apenas tenía seguridad ya que sus llamadas podían ser decodificadas con un demodulador FM (*Frequency Modulation*) [3].

#### 2.1.2. Red de comunicación móvil de segunda generación - 2G

Esta segunda generación introdujo el GSM (*Global System for Mobile Communication*) que funciona con FDMA (*Frequency-Division Multiple Access*) y con TDMA (*Time-Division Multiple Access*).

Era capaz de soportar una velocidad de hasta 64 kbps y su espectro se divide en canales de 200 KHz correspondientes a la parte de FDMA que a su vez se dividen en 8 slots temporales de la parte de TDMA [3].

#### 2.1.3. Generación – 2.5G

En esta generación, el GPRS (*General Packet Radio Service*) se introdujo con éxito, llegando a una velocidad de transmisión máxima de hasta 171 kbps.

Por otro lado, EDGE (*Enhanced Data GSM Evolution*) evolucionó para mejorar la velocidad de transmisión para redes GSM y era capaz de soportar un máximo de velocidad de transmisión de hasta 473.6 kbps [3].

#### 2.1.4. Red de comunicación móvil de tercera generación - 3G

Esta generación comienza con la introducción de UMTS (*Universal Mobile Telecommunication Systems*) como su núcleo de arquitectura de red, cuya velocidad de transmisión es de 384 kbps y soporta vídeo llamadas por primera vez en dispositivos móviles.

Usando conmutación de paquetes, la tecnología original mejoró hasta alcanzar velocidades máximas de 14 Mbps y operar en la banda de 2100 MHz con un ancho de banda de 15-20 MHz [4].

#### 2.1.5. Red de comunicación móvil de cuarta generación - 4G

Esta cuarta generación es capaz de transmitir simultáneamente voz y datos con un sistema LTE (*Long Term Evolution*) que mejore considerablemente la velocidad de transmisión y que puedan ser transmitidos mediante paquetes IP (*Internet Protocol*).

Los esquemas de modulación compleja son usados para multiplicar la capacidad de los enlaces ascendente y descendente.

MIMO (*Multiple Input Multiple output*) y OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) son las tecnologías clave que hacen posible el 4G, además una de sus características más importantes es que se basa en OFDMA (*Orthogonal*

*Frequency-Division Multiple Access), este hecho da una gran flexibilidad en la gestión de los recursos de radio [4].*

#### 2.1.6. Red de comunicación móvil de quinta generación - 5G

Utilizará ondas milimétricas así como espectro sin licencia para alcanzar una mayor velocidad de transmisión que teóricamente puede llegar hasta los 10 Gpbs.

Las redes 5G operarán también en rangos de frecuencia no comunes que oscilan entre los 30 GHz y los 300 GHz [4].

En la siguiente tabla se han resumido las características más relevantes de cada una de las generaciones de telefonía móvil:

Comparación	1G	2G	3G	4G	5G
Año introducción	1979	1983	2001	2009	2018
Tecnología	AMPS ( <i>Advanced Mobile Phone System</i> )	GSM	UMTS	LTE	MIMO
Sistema de acceso	FDMA	TDMA, FDMA	WCDMA ( <i>Wideband Code Division Multiple Access</i> )	OFDM	OFDM
Tipo de conmutación	Comutación analógica/circuitos	Comutación de circuitos para voz y conmutación de paquetes para internet móvil.	Comutación de circuitos para voz y conmutación de paquetes para internet móvil.	Comutación de paquetes.	Comutación de paquetes.
Servicio de internet	No internet.	Banda estrecha.	Banda ancha.	Ultra banda ancha.	Red mundial inalámbrica.
Ancho de banda	10 MHz.	25 MHz.	25 MHz.	100 MHz.	Al menos 100 MHz por operador.
Ventajas	Llamadas de voz.	Características multimedia (SMS, MMS), acceso a internet e introducción de SIM.	Alta seguridad, itinerancia internacional.	Velocidad, movilidad global.	Velocidades extremadamente altas, latencia baja.
Aplicaciones	Llamadas de voz.	Llamadas de voz, mensajes cortos.	Vídeo conferencia, televisión móvil.	Aplicaciones de alta velocidad, televisión móvil,	Alta resolución de vídeos transmitidos en directo, control remoto

				dispositivos.	de vehículos, robots y procedimiento s médicos.
--	--	--	--	---------------	--

Tabla 1. Comparación tecnologías de telefonía móvil [4].

## 2.2. Definición de la tecnología 4G

4G es la cuarta generación de la telefonía móvil que representa una versión mejorada y última de sí misma. Es la sucesora de la tecnología 3G y precede a la próxima generación, es decir, la 5G.

Se caracteriza por estar basada en IP y en España se distribuye a través de tres frecuencias: 1500 MHz, 1800 MHz y 2600 MHz, y cuatro frecuencias desde la liberación de 800 MHz, de forma que nuestro dispositivo móvil compatible elige entre una u otra para conseguir la máxima velocidad, esto es posible gracias a la técnica del *carrier aggregation*. Sin embargo, esta técnica no está disponible para el enlace de subida.

Las velocidades pico de transmisión y recepción teóricas de la señal pueden llegar a un mínimo de 100 Mb/s en movimiento y hasta 1 Gb/s en reposo. Estos valores se pueden dar en situaciones muy concretas y son imposibles alcanzarlos en situaciones normales puesto que la velocidad se puede ver afectada por una serie de factores como la saturación de la red, el rendimiento del dispositivo o la localización del terminal en el área de cobertura, haciendo que la velocidad real o percibida sea menor.

Análogamente a su velocidad máxima, destaca su baja latencia cuyos valores pueden oscilar entre 10 ms y 100 ms dependiendo del escenario en el que se ha realizado la medida [5].

En la ilustración 9, podemos observar un diagrama donde aparecen representadas distintas tecnologías así como su cobertura en entornos rurales en España, y donde se puede apreciar que 4G está disponible casi en cualquier localización.

### Cobertura poblacional por plataforma

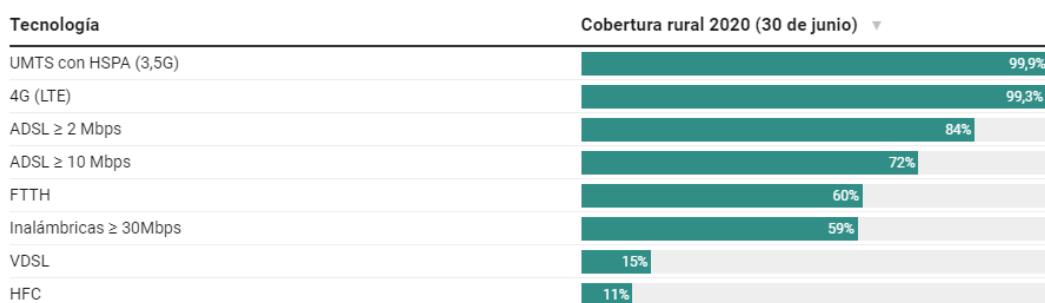


Ilustración 9. Cobertura poblacional por plataforma [6].

## 2.3. Estándar de telefonía móvil 4G

El estándar de telefonía móvil 4G se define y se estandariza en 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) con la participación de la ITU (*International Telecommunication Union*) en la definición y estudio de las necesidades que se querían alcanzar.

La industria que había desarrollado las tecnologías 3GPP lanzó un proyecto en diciembre de 2004 llamado LTE (*Long Term Evolution*) para estudiar los requerimientos de una nueva interfaz de aire llamada E-UTRA (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access*).

Los resultados de este estudio fueron recogidos en el documento Rel-7 3GPP TR 25.913 donde se pueden encontrar algunos de los objetivos propuestos como reducir la latencia, mejorar la eficiencia del espectro o incrementar los picos de velocidad de transmisión.

A medida que se iban realizando nuevos avances significativos en este estudio, se iban publicando nuevos documentos donde se incluían las mejoras realizadas con respecto a los objetivos iniciales establecidos, esto es conocido como *release*.

En lo que respecta a 4G, cabe destacar la *release* 3GPP V10.3.0 [7] que recoge una lista con todas las especificaciones relacionadas con la cuarta generación incluyendo la red troncal EPC (*Evolved Packet Core*) y los aspectos del sistema.

## 2.4. Funcionamiento del 4G

La tecnología 4G está basada en IP, esto quiere decir que utiliza un protocolo estándar de comunicación para enviar y recibir paquetes de datos. Con estos datos estandarizados, pueden atravesar todo tipo de redes sin ser codificados ni dañados.

Además, para que esta emisión y recepción de datos sea posible, en primer lugar nuestro dispositivo móvil debe comunicarse con una estación base, que transmite datos hacia y desde internet de la misma forma que lo hace a un dispositivo móvil compatible.

Gracias a LTE, los dispositivos pueden transmitir y recibir datos simultáneamente porque usan diferentes frecuencias para estas tareas gracias a FDD (*Frequency Division Duplexion*), que dividen las señales en flujos de datos paralelos que viajan por subcanales de radio. En oposición, tendríamos TDD (*Time Division Duplexion*) que no permitiría recibir y transmitir simultáneamente. Tanto FDD como TDD son permitidos por 4G. Gracias a estos, se incrementa la capacidad respecto a 3G. En 4G, dentro de estas

tecnologías destaca OFDMA en la cual se basa esta generación de telefonía móvil [8].

## 2.5. Principales características técnicas

En la siguiente tabla se describen de forma breve las características técnicas más relevantes de la cuarta generación de telefonía móvil:

<b>Velocidades de transmisión pico</b>	Hasta 300 Mbps en el enlace descendente y 75 Mbps en el enlace ascendente.
<b>OFDM y SC-FDMA (<i>Single Carrier – Frequency Division Multiple Access</i>)</b>	Emplea técnicas de acceso múltiple OFDM para enlace descendente ( <i>downlink</i> ) y SC-FDMA para el enlace ascendente ( <i>uplink</i> ).
<b>Bandas de operación</b>	800 MHz, 1500 MHz (no subastada), 1800 MHz y 2600 MHz.
<b>Canalización</b>	De 10 MHz, 14.6 MHz y 20 MHz.
<b>Ancho de banda</b>	Escalable entre los valores 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz .
<b>Aplicaciones</b>	Cualquier tráfico IP.
<b>MCS (<i>Modulation and Coding Scheme</i>) dinámico</b>	Se selecciona el mayor en función del canal radio de cada usuario.

Tabla 2. Principales características técnicas de 4G [9].

## 2.6. LTE vs LTE-A

Se realiza la comparación entre ambas tecnologías por su similitud, ya que una red LTE-A (*Long Term Evolution – Advanced*) funciona con características muy similares a una red LTE pero a velocidades más altas y una menor latencia, por lo que podemos anticipar que el servicio ofrecido por una red LTE-A destaca en velocidad respecto a una red LTE.

En la tabla 3, en lo referente a los valores de latencia indicados, al ser obtenidos de la referencia literaria [10], mencionar que estos varían en función de la red y es complicado saber si se habla de la latencia de la red de acceso (RAN - *Radio Access Network*) o del *end-to-end*. Por lo que, dichos valores son orientativos, y en este caso en concreto, el valor de la latencia de LTE-A es aproximadamente la mitad de la de LTE.

En la Tabla 3 podemos ver una breve comparación entre algunas de las características más destacadas de ambas tecnologías, donde se aprecia que LTE-A tiene una mayor velocidad de descarga y menor latencia y que por tanto, podemos confirmar que esto le da una clara ventaja en cuanto a velocidad se refiere [11].

Característica	LTE-A	LTE
<b>Método de transferencia de datos</b>	Comutación de paquetes	Comutación de paquetes
<b>Velocidad de transmisión pico</b>	Hasta 400 Mbps en el enlace descendente y 75 Mbps en el enlace ascendente	Hasta 300 Mbps en el enlace descendente y 75 Mbps en el enlace ascendente
<b>Latencia</b>	5 ms	10 ms
<b>Carrier Aggregation</b>	Puede combinar o agregar hasta 5 frecuencias de portadora	No

Tabla 3. Breve comparativa entre LTE-A y LTE [11].

## 2.7. Arquitectura de una red 4G

La utilización de tecnologías IP tanto en el núcleo como en las redes de acceso es la principal característica de las redes 4G, de esta forma, soporta todos los servicios. Además, en este tipo de redes, existe un núcleo IP sobre el que se transportará todo el tráfico.

EPS (*Evolved Packet System*) es la red troncal de 4G, qué a su vez, es una evolución de la arquitectura GPRS con una arquitectura simplificada y una AIPN (*All-IP Network*).

El EPC (*Evolved Packet Core*) está compuesto por:

1. **MME (*Mobility Management Entity*)**: componente clave de la red troncal, está definido por estándares y proporciona administración de sesiones de movilidad para la red de banda ancha LTE, para la autenticación de suscriptores, roaming y traspasos a otras redes.
2. **SGW (*Serving Gateway*)**: es una función de red crítica para la red troncal 4G. La SGW reside en el plano de usuario donde reenvía y enruta paquetes hacia y desde el eNodeB y la puerta de enlace de la red de paquetes de datos (PGW). El SGW también sirve como ancla de movilidad local para el traspaso entre eNodeB y la movilidad entre redes 3GPP.
3. **PGW (*Packet Data Network Gateway*)**: reemplaza al GGSN (*Gateway GPRS Support Node*). Las comunicaciones recibidas son las de los usuarios pertenecientes al operador independientemente del país en el que se encuentren. Es el final de la red móvil en cuanto a datos se refiere. El GGSN también realiza funciones de control y tarificación, además, todos los datos necesarios para la facturación son enviados desde este elemento.

4. **PCRF (*Policy and Charging Rules Function*):** también conocido como *Integrated Policy and Charging Control*. La gestión de políticas permite a los operadores controlar dinámicamente los recursos de la red con políticas en tiempo real basadas en el servicio, el suscriptor o el contexto de uso. La carga es la función central para recopilar registros de uso, calificarlos y cobrarlos en tiempo real.

Por otro lado, en la parte de la radio tenemos la E-UTRAN:

1. **eNodeB (*Evolved Node B*):** estación que proporciona la interfaz de radio situada en cada emplazamiento. Incorpora las funciones de RNC (*Radio Network Controller*) por lo que no hay ningún controlador. Se conecta directamente a una red TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) particular del operador. La comunicación se encripta, ya que es una red similar a internet y por tanto, existe un riesgo de que se puedan espiar las conversaciones.

Este elemento se sitúa en la E-UTRAN y añade funciones como la gestión de los recursos radio, la encriptación/desencriptación de la información transmitida en los planos de usuario y control o el traspaso de llamadas (*handover*). De esta forma, la comunicación entre estaciones base cercanas es mucho más directa, lo que repercute directamente en una disminución de los costos de mantenimiento y actualización.

2. **UE (*User Equipment*):** hace referencia al terminal de usuario. Es el equipo que permite a los usuarios acceder a los servicios de la red 4G a través de la interfaz radio. El UE contiene dos elementos básicos: un módulo de suscripción del usuario (SIM/USIM) y el equipo móvil propiamente dicho (Mobile Equipment / ME). Adicionalmente, las funciones del equipo móvil se agrupan en dos entidades funcionales: la terminación móvil (*Mobile Terminal*, MT) y el equipo terminal (*Terminal Equipment*, TE).

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC (*Evolved Packet Core*) en conjunto son las encargadas de proporcionar servicios de transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuarios y redes externas como Internet. Estos, son denominados servicios portadores EPS cuyas prestaciones en términos de *throughput*, retardos y pérdidas pueden ser configuradas según el servicio final al cual estén asociados.

En esta línea, podemos destacar que existen una serie de interfaces que definen la interconexión de elementos en una red 4G, entre las que podemos destacar S1-U que facilita la interfaz entre el eNodeB y el núcleo de la red y S1-MME (*S1-Mobility Management Entity*) destinado a información de control.

Respecto a esta interfaz S1, está formada a su vez por dos interfaces: S-GW (*Gateway*) y S1-MME que ya hemos anticipado anteriormente.

Los eNodeBs proporcionan la conectividad entre los equipos de usuario (UE) y la red troncal EPC.

De forma análoga, gracias a la interfaz X2 existe una conexión directa entre diferentes eNodeBs. Esta interfaz está directamente relacionada con la gestión de los recursos radio. Los eNodeBs, podrán hacer uso de esta interfaz para enviar los mensajes de tráfico de los usuarios cuando éstos realicen un mensaje señalización con el objetivo de reducir la interferencia entre eNodeBs [12].

En la Ilustración 10 podemos ver el modelo de referencia de la arquitectura de red 4G con los elementos e interfaces vistas en este apartado:

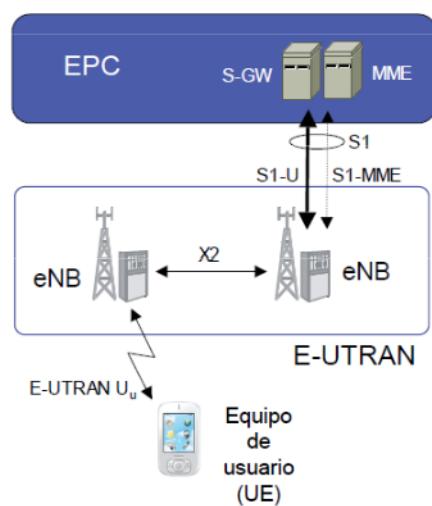


Ilustración 10. Arquitectura a nivel básico de una red 4G [12].

## 2.9. Capa física: Interfaz radio

### 2.9.1. Modulaciones

En LTE la calidad de la señal recibida depende de distintos factores como el nivel de interferencia con otras celdas, el nivel de ruido y la calidad del canal empleado. Para optimizar la transmisión de información, lo que se hace es adaptar la tasa de bits a las variaciones del medio. Esto se conoce como AMC (*Adaptive Modulation and Coding*).

LTE hace uso de las modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM, donde el número de bits por símbolo es de 2, 4 y 6 respectivamente. Se emplearán modulaciones de mayor nivel cuando nuestra comunicación presente un alto nivel de SINR (*Signal-to-interference-plus-noise ratio*), como por ejemplo 64-QAM. A pesar de que esta sea más sensible a errores, proporciona un mayor flujo de datos.

Por otro lado, si las condiciones en nuestro enlace son limitadas, prevalecerá el uso de modulaciones más bajas como por ejemplo QPSK, para de esta forma dar mayor robustez a pesar de tener una tasa menor, este hecho también se da en la codificación.

### 2.9.2. Escalabilidad de ancho de banda

Una de las características más importantes de este estándar es el soporte de anchos de banda variables que van desde 1.4 hasta 20 MHz, aportando una gran flexibilidad al sistema. Además, independientemente de la cantidad de espectro proporcionado, el espacio entre subportadoras será siempre de 15 kHz.

El ancho de banda empleado por el canal tiene una relación directa con el número de bloques de recurso (RB – *Resource Block*) que le serán otorgados al usuario, y por tanto, como con la velocidad final presente en el enlace.

### 2.9.3. Técnicas de acceso al medio

A nivel físico, 4G implementa una tecnología mediante la cual se utilizan de forma más eficiente los recursos radio disponibles en comparación con los sistemas anteriores. La tecnología 4G utiliza técnicas de acceso múltiple basadas en la técnica de transmisión OFDM, estas son OFDMA para el enlace descendente y SC-FDMA para el enlace ascendente.

Aprovechar de manera eficiente el ancho de banda, evitar interferencias y alcanzar transferencias de datos de alta velocidad son las ventajas de utilizar este tipo de modulaciones respecto a otros sistemas.

La técnica OFDMA constituye un mecanismo de transmisión multiportadora basado en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras ortogonales entre sí. Los espectros de las subportadoras son ortogonales algo que no supone un impedimento para la separación en recepción y posterior recuperación de los símbolos transmitidos [13].

En la siguiente ilustración podemos ver una comparativa de la forma de acceso múltiple utilizada por las tecnologías OFDM y OFDMA que veremos con más detalle en los subapartados 2.9.3.1 y 2.9.3.2.

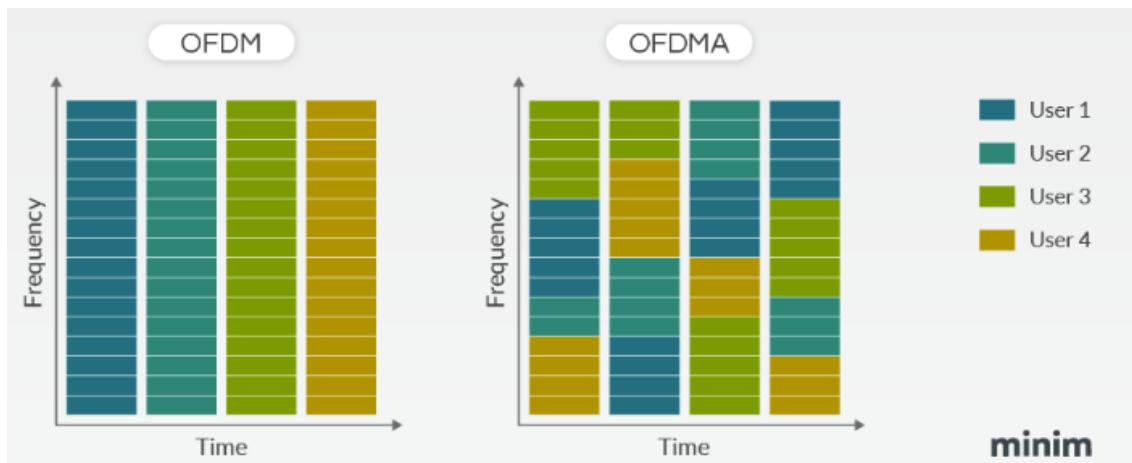


Ilustración 11. Acceso múltiples usuarios [14].

#### 2.9.3.1. OFDMA

OFDMA es la versión multiusuario de OFDM que permite asignación dinámica de subportadoras a cualquier usuario en cualquier momento mediante la explotación de los dominios del tiempo y de la frecuencia y puede facilitar la comunicación con múltiples usuarios simultáneamente en el enlace descendente. Mientras que OFDM es capaz de soportar un usuario en cualquier momento.

Se basa en la forma de onda de OFDM y utiliza las subportadoras creadas por OFDM de maneras ligeramente diferentes. FDMA es para transmitir desde la estación base transmisora y la estación base receptora [14].

#### 2.9.3.2. SC-FDMA

Respecto a la técnica de acceso múltiple SC-FDMA, destacar que este tipo de transmisiones son de portadora única (*single carrier*) donde toda la información está modulada y contenida en una sola portadora que ocupa una banda de frecuencia definida. Además, algunas de sus características como la fase, frecuencia o amplitud pueden ser modificadas por un transmisor que tenga las capacidades adecuadas.

Esta modulación es también una extensión de OFDM, concretamente, es una técnica de modulación híbrida que combina las ventajas de OFDMA como la elección de subportadoras y la robustez frente a la propagación multicamino con una relación potencia instantánea – potencia menor en comparación a la del sistema OFDMA.

Mediante esta técnica se reduce el PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) de manera significativa en comparación con OFDMA, transmitiendo en subportadoras en secuencia y no en paralelo como ocurre en OFDMA [15].

En la ilustración 12 podemos ver un esquema del proceso de modulación de esta técnica

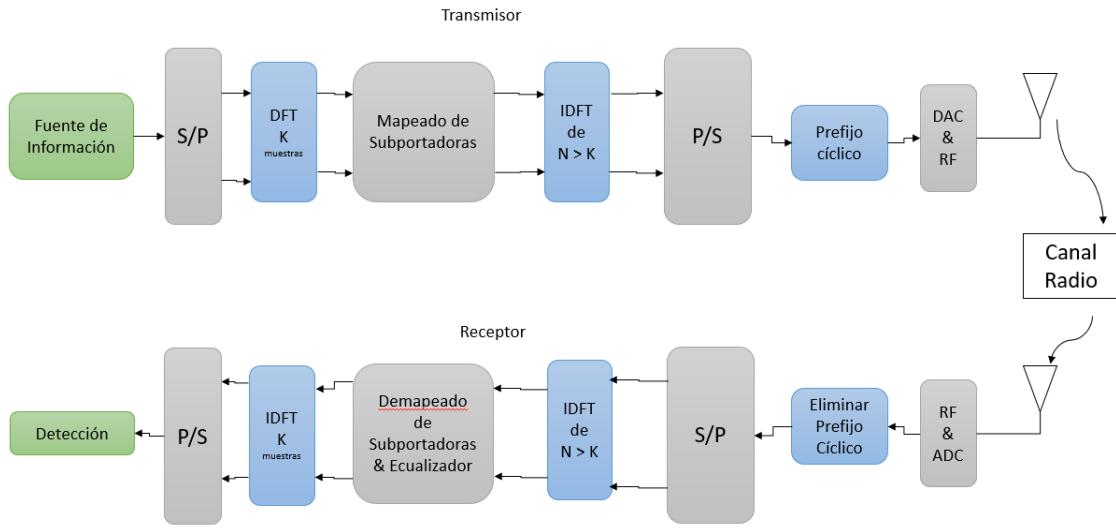


Ilustración 12. Transmisor y receptor SC-FC (Single Carrier Frequency Domain) [15].

Se puede utilizar la versión rápida IFFT / FFT (*Inverse Fast Fourier Transform / Fast Fourier Transform*) ya que el valor de las muestras N de los IDFT / DFT (*Inverse Discrete Fourier Transform / Discrete Fourier Transform*) suele ser una potencia de dos. Las K muestras se pueden colocar a la salida del DFT (tras el mapeamiento) en posiciones no contiguas a la entrada del IDFT.

#### 2.9.4. MIMO

Con el objetivo de mejorar las prestaciones del enlace, 4G implementa la técnica de múltiples antenas en recepción y transmisión denominada MIMO (*Multiple-Input and Multiple-Output*), cuyo objetivo principal es lograr el aumento de la velocidad de transferencia que variará dependiendo de la cantidad de antenas agregadas.

La técnica MIMO tiene dos modos de funcionamiento: modo de multiplexación espacial y modo de transmisión por diversidad. El primer método permite transmitir distintos flujos de datos por cada una de las antenas, y al ser transmitidos de forma simultánea, se produce un aumento en la tasa de datos. Mientras que en el segundo método, se trata de utilizar la diversidad para otorgar mayor robustez a la transmisión. Todas las antenas envían la misma información de manera esencial, aprovechando la propagación multicamino para reducir la tasa de error y así aumentar la tasa de transmisión.

Se pueden llevar a cabo varias configuraciones para el uso de esta técnica, de acuerdo a las condiciones del enlace a diseñar. Por un lado tenemos 2x2, 4x2 y 4x4 para el enlace descendente, mientras que para el enlace ascendente se puede hacer uso de 1x2 y 1x4.

Según el tratamiento que se le dé a la información a transmitir por las diversas antenas, los modos de operación de esta técnica serán diferentes según lo descrito en [16].

- **Diversidad en transmisión:** consiste en transmitir el mismo flujo de información por las múltiples antenas. Busca mejorar la relación señal a ruido de recepción aprovechando los múltiples caminos de propagación del entorno.
- **Multiplexación espacial:** consiste en transmitir distintos flujos de información por las antenas. Busca incrementar la velocidad de transmisión percibida.
- **Beamforming:** consiste en utilizar antenas inteligentes para lograr una conformación de haz buscando eliminar las interferencias.

### 3. Diseño red 4G

#### 3.1. Introducción

En el apartado anterior se han explicado de forma general los aspectos más relevantes de la tecnología 4G haciendo hincapié en aquellas características que son de mayor utilidad de cara a afrontar este proyecto, con el fin de introducir dicha tecnología antes de dar el salto al diseño de la red 4G en un escenario real.

Antes de realizar dicho diseño, es muy importante hacer una planificación de nuestro sistema de comunicaciones para elegir los emplazamientos adecuados y la correcta asignación de frecuencias para proporcionar la QoS (*Quality of Service*) esperada por los usuarios.

La ubicación seleccionada requiere de un determinado nivel de potencia de la señal y el número de usuarios requiere una capacidad determinada. Cobertura y capacidad son indirectamente proporcionales en nuestro caso, esto quiere decir que para lograr una buena cobertura hay que sacrificar la capacidad y viceversa.

En esta línea, una mayor cobertura nos permite dar servicio a un área mayor, pero a pesar de esto, cuanto mayor es el área de cobertura, mayor es la distancia a la cual pueden estar los usuarios y decrece la eficiencia espectral, esto es, la capacidad.

Para todo esto, vamos a encontrar la mejor ubicación dentro del entorno en el que se desea desplegar dicha red y posteriormente analizar sus requerimientos. Entre estos requisitos tendremos que analizar aspectos como la cobertura o las necesidades de capacidad.

Dicha red será diseñada en las pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia, una zona rural, aislada de las grandes ciudades que a priori, presenta

dificultades derivadas de su propia naturaleza, donde su población es muy reducida pero que recibe un elevado número de turistas en temporadas altas.

Los lugares escogidos son reales y existen geográficamente, sin embargo, el problema planteado se ha elaborado para fines docentes ligados a este trabajo de fin de grado y por tanto, no es real.

No se ha encontrado información sobre la existencia de una red 4G similar a la que se pretende diseñar en el área escogida, sin embargo, un proveedor de telecomunicaciones de la zona ofrece conexión 4G en poblaciones similares cercanas a dicha zona.

### 3.2. LTE en la Región de Murcia

Es interesante conocer de forma breve cual es la situación actual de este tipo de redes en la Región de Murcia, ya que es el escenario en el que se diseñará nuestra red.

Según datos de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, la Región de Murcia es una comunidad de gran interés para las compañías operadoras en cuanto a la explotación de servicios de telefonía se refiere. Respecto a esto, en la siguiente ilustración se muestra el número de estaciones base de LTE desplegadas por provincias.

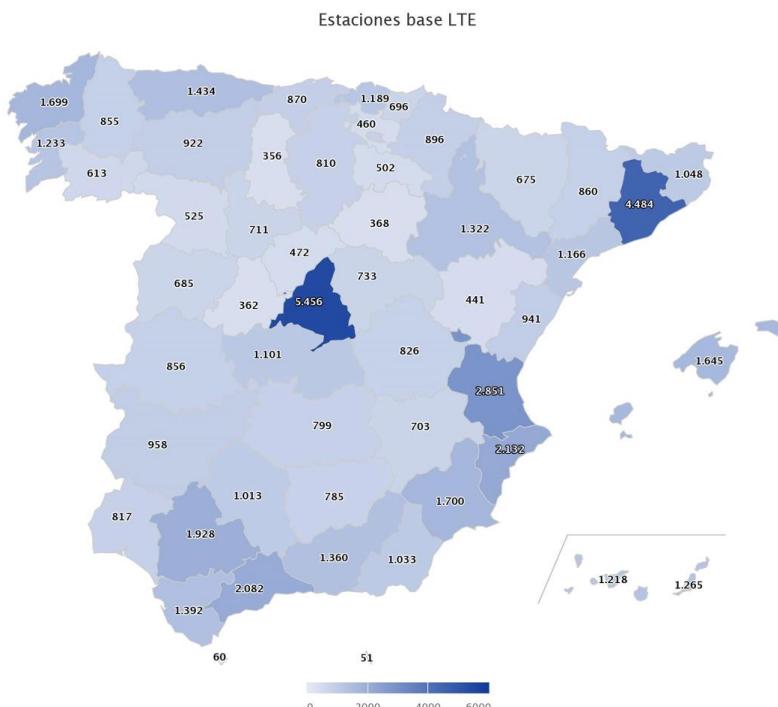


Ilustración 13. Número de estaciones base LTE por provincias [17].

El dato mostrado de 1700 estaciones bases es un valor global del año 2021.

### 3.3. Elección de la zona geográfica donde implementar la red

El primer paso antes de diseñar la red ha sido estudiar varias zonas rurales de la Región de Murcia que estuvieran más aisladas, preferiblemente en terreno montañoso y que, a priori el despliegue de una red de tecnología inalámbrica como el 4G presentase ciertos retos. La región de Murcia presenta varias zonas que cumplen estas características, sin embargo, podríamos decir que la más aislada de todas es la zona de las pedanías altas del noroeste, por lo que desde un principio se tenía claro que la red 4G se iba a desarrollar en dicha zona. No obstante, esta zona es bastante extensa, contando con numerosos puntos de interés turístico y cultural.

Paralelamente a esto, también se ha analizado la existencia de las infraestructuras de telecomunicaciones de la zona que tuvieran alguna antena compatible con 4G, de forma que pueda ser utilizada como punto de partida de nuestra red.

En la ilustración 16 obtenida de *Google Maps*, podemos ver la zona descrita, donde se puede observar el abundante relieve montañoso por el que está rodeada:

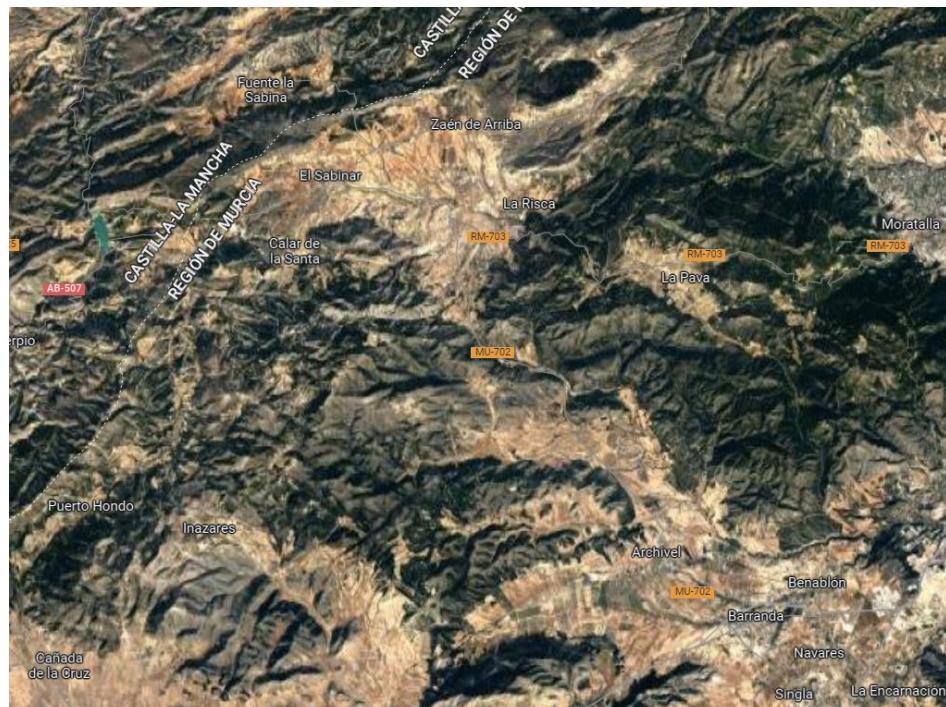


Ilustración 14. Mapa pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia obtenido con el modo satélite de *Google Maps*.

Posteriormente, se ha estudiado el despliegue de una red 4G teniendo en cuenta 3 de los municipios más grandes de dicha zona, situados en torno al

pico más alto de la Región de Murcia que atrae a turistas, sobre todo amantes de la montaña y cuya distancia entre sí pueda ser cubierta por una teórica red 4G.

Además, también se ha tenido en cuenta que estos municipios fueran accesibles de una u otra forma por la antena 4G del proveedor de telecomunicaciones.

### 3.4. Objetivo: Diseño de una red 4G en las pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia

De la forma que anticipábamos en el apartado 3.1, la fase de diseño de una red 4G va precedida de una fase de planificación y análisis de requerimientos donde se deben tener en cuenta varios factores para lograr que la red cumpla con la calidad de servicio requerida.

Queda establecido el objetivo de proporcionar cobertura a un conjunto de pueblos de la zona de las pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia.

La herramienta que se empleará será *Xirio Online*, un SaaS (*Software as a Service*) que cuenta con las características necesarias para llevar a cabo una simulación de la cobertura a partir de las propiedades descritas.

Se situarán *eNodeBs* y *UEs* de forma estratégica y se simularán las coberturas de las estaciones base para observar si cumplen los objetivos establecidos como por ejemplo un valor determinado de SINR.

Todos los radio enlaces sufren pérdidas debidas a factores ambientales o características del entorno entre otros. *Xirio Online* permite modelar estas pérdidas según el modelo Okumura - Hata, que a pesar de no ser el modelo más preciso para entornos rurales se ha decidido utilizarlo por ser considerado como uno de los más simples además de poder ofrecer resultados al nivel esperado en un proyecto de este tipo.

Para poder alcanzar este objetivo, alguno de los aspectos a tener en cuenta son el grado de satisfacción del usuario que vendrá precedido por la previsión en términos de demanda de los usuarios que se verá directamente influenciado por el modelo de propagación utilizado así como la distribución de las celdas. Estos aspectos se verán en los siguientes subapartados:

#### 3.4.1. Calidad de servicio

QoS es el efecto global de la calidad de funcionamiento de un servicio que determina el grado de satisfacción del usuario según la ITU [18].

En 4G, el QoS se aplica a nivel de la portadora del EPS donde existe un mapeo uno a uno, esto quiere decir que para una portadora del EPS hay un RAB (*Radio Access Bearer*) equivalente, un portador S1 y un portador de radio (RB – *Radio Bearer*) [19].

En la ilustración 17 podemos ver los dos tipos de portadoras (por defecto y dedicada) para el QoS en LTE.

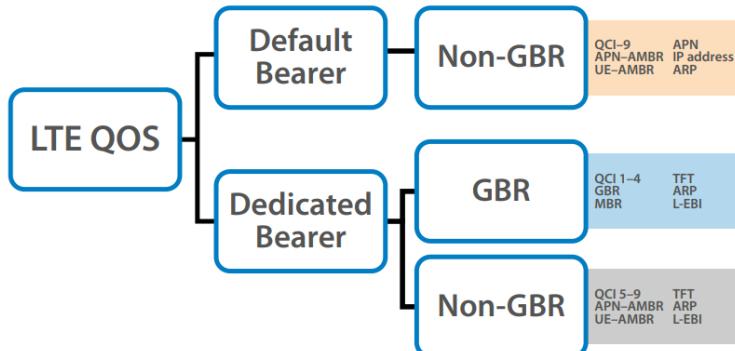


Ilustración 15. Esquema QoS en LTE [19].

El concepto de portadora (*bearer*) en una red de banda ancha fija es similar al concepto de manejo del tráfico virtual. Las portadoras predeterminadas como el usuario de datos final se tratan cuando viajan a lo largo de una red LTE.

La red puede tratar ciertos tipos de datos de forma prioritaria o tratarlos de forma normal. De una forma más simple, las portadoras LTE son un conjunto de parámetros de red que definen un trato específico de los datos.

Un claro ejemplo del uso de portadoras sería proporcionar paquetes de servicios escalonados, esto quiere decir que si para un subscriptor *premium* siempre se obtiene al menos una velocidad de descarga de 5 Mbps en su servicio de banda ancha LTE, para un subscriptor con un paquete básico no se puede garantizar la tasa de datos y su velocidad dependerá de las condiciones de tráfico de la red [19].

### 3.4.2. Modelos de propagación

El conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un escenario dado se conocen como modelos de propagación.

Generalmente, los modelos de propagación se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos (semi empíricos).

Por un lado, los modelos empíricos se basan en mediciones, mientras que por otro lado, los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio. Los modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal de RF (*Radio Frequency*) pueda tener entre una estación base y un receptor móvil o fijo.

Una de las principales ventajas de modelar radiocanales teniendo en cuenta las características de la trayectoria entre Transmisor (Tx) y Receptor (Rx) es conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores para así poder hacer una estimación de las necesidades, costos o capacidad de los equipos requeridos.

En la Ilustración 16 podemos ver tres factores a tener en cuenta a la hora de aplicar modelos de propagación:

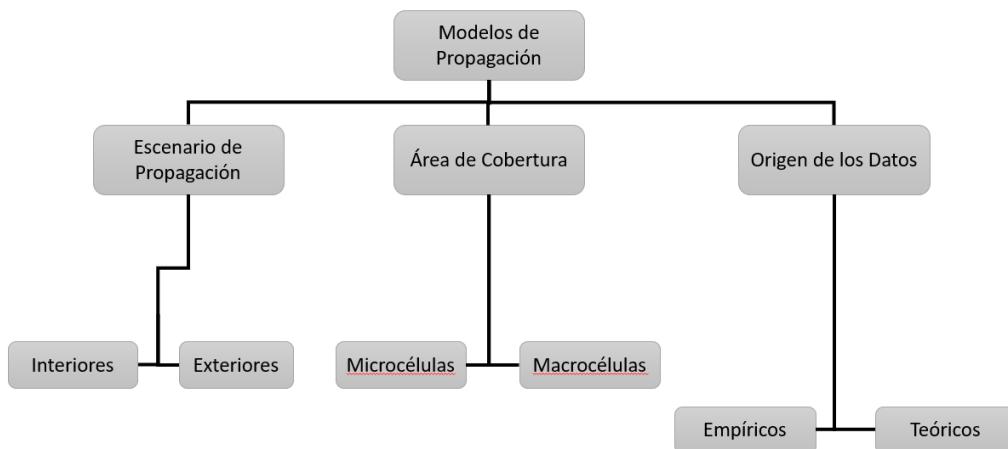


Ilustración 16. Factores en los modelos de propagación.

### 3.4.2.1. Modelo Okumura – Hata

A pesar de que este modelo es más adecuado para el cálculo de predicción de la pérdida de propagación en áreas urbanas y estar considerado como uno de los más eficaces en dichas áreas, también es posible aplicarlo en zonas rurales aunque no garantiza obtener buenos resultados en estas zonas ya que no considera la ondulación del terreno ni los efectos derivados de las zonas urbanas a lo largo del trayecto.

Por un lado, tenemos el resultado del trabajo de Okumura que consiste en un conjunto de curvas que presentan el nivel de atenuación media relativa del espacio libre en función de la frecuencia, la distancia entre el emisor y receptor o de varios factores de corrección específicos según el tipo de trayecto. A modo de ejemplo, en la ilustración 17, podemos observar la gráfica de la atenuación media relativa en función de la frecuencia.

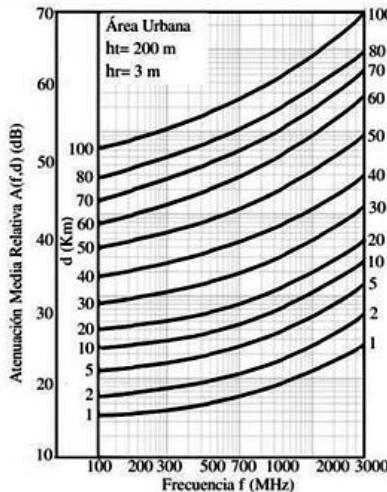


Ilustración 17. Atenuación Media Relativa  $A(f, d)$  (dB) en función de la frecuencia  $f$  (MHz) [21].

Mientras que por otro lado, tenemos una serie de ecuaciones con el propósito de hacer más fácil de aplicar el método gráfico propuesto por Okumura. Estas expresiones son de carácter empírico y juntas forman el modelo conocido como Okumura – Hata o simplemente modelo de Hata.

Este modelo está restringido a una frecuencia límite que oscila entre los 150 MHz y los 1500 MHz, una altura de la estación base de entre 30 m y 200 m, de igual forma que para la base entre 1 m y 10 m y, una distancia entre el transmisor y receptor de 1 km a 20 km.

La pérdida básica de propagación para el modelo de Okumura – Hata viene definida por la siguiente ecuación:

$$L_b (\text{urban}) = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d \quad (1)$$

Donde:

- $f$  es la frecuencia en MHz
- $h_b$  es la altura de la estación base
- $h_m$  es la altura del terminal móvil
- $d$  es la distancia entre el eNodeB y el UE

Además, para áreas rurales la siguiente ecuación nos indica como estas pérdidas quedan definidas:

$$L_b = L_b (\text{urban}) - 4.78 \log (f)^2 + 18.33 \log f - 40.94 \quad (2)$$

El resultado que facilita el modelo es el valor mediano de la pérdida de propagación en función de la frecuencia, la distancia y las alturas de las antenas de la estación base y el móvil, aunque no incluye los factores de corrección en función del trayecto [22].

En nuestro caso, puesto que las características de la red a desplegar cumplen con los requisitos del modelo de Okumura – Hata, se pueden calcular las pérdidas sin ningún problema, sin embargo, como hemos comentado, este modelo no garantiza resultados buenos en entorno rurales.

### 3.4.3. Celdas en telefonía móvil

Las celdas en telefonía móvil son utilizadas para dar servicio a un territorio sin dejar ninguna zona fuera de cobertura. Las redes inalámbricas dividen dicho territorio en cuadrículas que serían nuestras celdas, cuya área cubierta puede variar desde unos pocos metros de una ciudad muy poblada hasta unos 200 km<sup>2</sup> cada celda.

La celda ideal mostrada en la literatura es de forma hexagonal puesto que esta figura geométrica permite cubrir una determinada región geográfica con el menor número de celdas posible sin dejar áreas fuera del rango de cobertura, además de permitir que la distancia entre las antenas de las celdas sea la misma en todo el territorio para de esta forma evitar problemas de mala recepción de la señal.

Un conjunto de frecuencias de radio es utilizado por cada celda para favorecer la comunicación en su área específica cuyo alcance está limitado a los bordes de la celda que da servicio y para evitar problemas de interferencia una misma frecuencia no puede ser utilizada en celdas contiguas pero si cercanas.

La siguiente imagen nos muestra como quedaría la división de un territorio rural mediante el uso de celdas hexagonales:

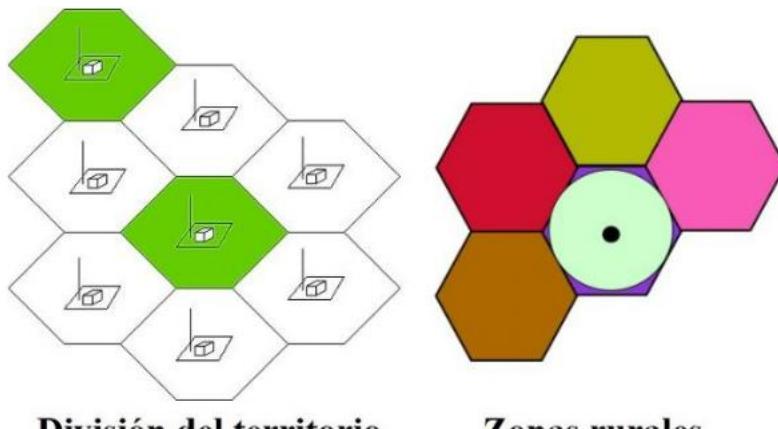


Ilustración 18. División de un territorio en celdas y antena omnidireccional situada en el centro de una celda en un área rural [23].

### 3.5. Xirio Online

En este apartado, vamos a realizar una breve introducción al software que vamos a utilizar para realizar las simulaciones de nuestra red, este es *Xirio Online*.

*Xirio Online* es una herramienta que se ha utilizado para realizar determinadas simulaciones de este proyecto. Es una herramienta de planificación radioeléctrica que utiliza una cartografía de alta resolución de ambientes así como de entornos urbanos y rurales de todo el mundo.

*Xirio Online* distingue cinco tipos de estudio: perfil, cobertura, cobertura multitransmisor, red de transporte y altura efectiva. Aunque tan solo el estudio básico de perfil y cobertura son gratuitos, para el resto existe una cuota variable en función de las necesidades del usuario.

Esta herramienta, desarrollada por la empresa APTICA, permite realizar de forma rápida y económica simulaciones profesionales de cobertura radioeléctrica en cualquier parte del mundo y escenario mediante el uso de cartografía de alta resolución.

Se accede a través de su web: <https://www.xirio-online.com/web/home/welcome.aspx>

Entre sus características, destaca que su acceso es online, es decir, es un SaaS, por lo que no requiere de ninguna instalación local como si sucede con otros softwares similares, sino que se puede acceder en línea desde cualquier dispositivo con acceso a Internet mediante unas credenciales previamente creadas por el propio usuario.

En la siguiente ilustración podemos ver la interfaz de *Xirio Online* desde el menú principal:

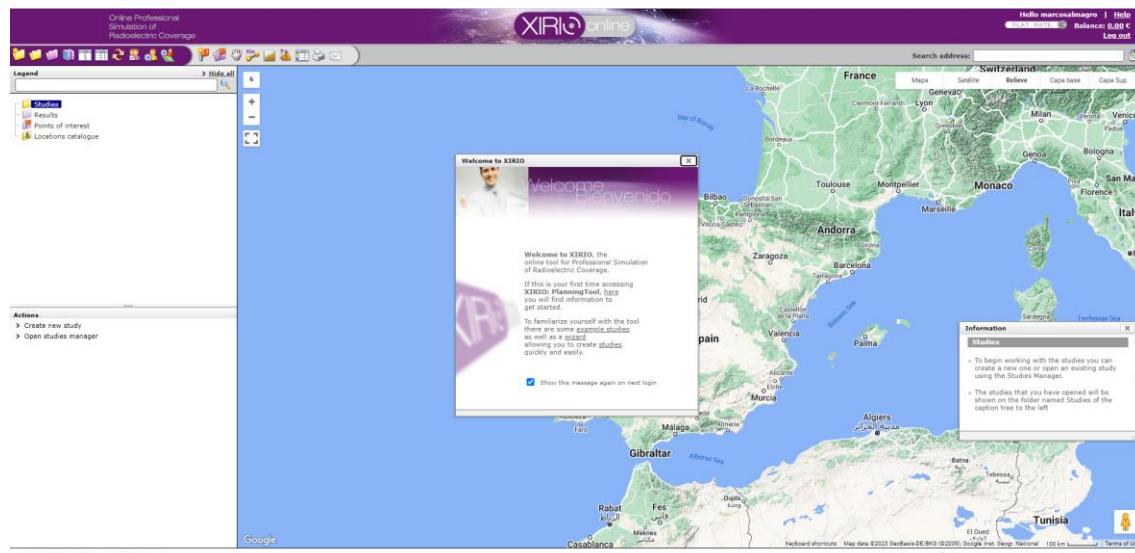


Ilustración 19. Interfaz de *Xirio Online*.

### 3.6. Análisis de requerimientos de una red

El análisis de requerimientos de una red se puede dividir en análisis de redes, análisis de los requerimientos de usuario así como la especificación de requerimientos.

- 1. Análisis de redes:** este análisis se enfoca en los requerimientos de los usuarios, es decir, el enfoque de sus aplicaciones y los dispositivos a utilizar así como las relaciones que existen entre todos estos elementos.

Respecto a la red 4G a diseñar, se ha realizado un mapeo de usuarios contabilizando entre los 3 municipios un total de unos 340 habitantes. Más adelante especificaremos estos datos, puesto que son relevantes.

Las empresas locales no son más que pequeños negocios como tiendas que están manejadas por habitantes locales, por lo que el censo se mantendría.

Respecto a las aplicaciones y dispositivos, no se requiere de nada adicional más allá de acceso a contenido multimedia, de chat instantáneo o redes sociales. De igual forma, los dispositivos a utilizar por dichos usuarios serían teléfonos inteligentes compatibles con 4G u ordenadores portátiles o de sobremesa compatibles con dicha tecnología.

- 2. Análisis de requerimientos de usuario:** en este análisis, se examina más en detalle los requerimientos del usuario ya introducidos en el análisis de redes visto en el punto anterior.

En este sentido, se trata de realizar un análisis formal sobre cualquier producto o servicio, aunque no se puede conocer a ciencia exacta. El objetivo, no es más que incrementar las probabilidades de aciertos en las etapas de diseño e implementación.

Los servicios requeridos no van más allá que los de una red básica de servicios como la que se diseñará más adelante, cuyos primeros elementos en la lista incluyen algunos como compartir archivos, correo electrónico, acceso a plataformas de contenido online (YouTube, Netflix...) y acceso a internet que tendrán una implicación en el tráfico y seguridad de la red.

Tras conocer los servicios requeridos, tenemos que determinar el número de usuarios que normalmente van a requerir acceso a la red en cualquier momento, aunque en este sentido, lo más importante es estimar la demanda en horas pico, es decir, aquel escenario en el que el máximo número de usuarios en una zona determinada requiera una alta demanda del servicio.

En base a esto, se podrá realizar una estimación del rendimiento de la red, es decir, cuanto tiempo la red funciona de modo normal.

Sin embargo, el rendimiento puede tener un significado diferente dependiendo del usuario final, ya que cada persona tiene expectativas diferentes en función de sus necesidades y tipo de dispositivo empleado. En base a esto, se pretende realizar una estimación.

### 3. Especificación de los requerimientos:

En este punto, se incluyen todos los requerimientos de la red que hemos visto anteriormente, pero en este caso incluimos todos los servicios y los niveles mínimos de rendimiento que debe cumplir nuestra red. Esta especificación, provee un conjunto de criterios que la red debe cumplir teniendo en cuenta todas las limitaciones.

Para nuestro caso, algunas de las especificaciones de los requerimientos analizadas son:

- Estimaciones sobre los servicios y tráfico de red.
- Cálculos del *Link Budget*.
- Estimación de la cobertura de la celda
- Despliegue de equipos y software de usuarios finales.
- Limitaciones de presupuesto.

Además de todos los puntos tratados en este apartado, también se podrían incluir las distintas fases de diseño de una red, donde se incluiría un diseño lógico, físico además de una prueba y optimización del diseño.

Sin embargo, puesto que el diseño de nuestra red es simplemente a nivel teórico incluyendo alguna simulación mediante un *software* adecuado para fines de este proyecto, no vamos a entrar en detalle con respecto a esto, simplemente mencionarlo.

## 3.7. Estudio de requerimientos de la red 4G a diseñar

### 3.7.1. Bandas de frecuencia

La tecnología 4G es posible gracias al estándar LTE que define 40 posibles bandas de trabajo que siguen el modo de duplexación FDD (*Frequency-Division Duplexing*) o TDD (*Time Division Duplexing*).

Las frecuencias licenciadas en 4G pueden ser las siguientes:

- 800 MHz que abarca las frecuencias desde 791 MHz hasta 862 MHz y que constituye la banda 20 de LTE.
- 1800 MHz que abarca las frecuencias desde 1710 MHz hasta 1880 MHz y que constituye la banda 3 de LTE.

- 2600 MHz que abarca las frecuencias desde 2500 MHz hasta 2690 MHz y que constituye la banda 7 (banda 38) utilizada exclusivamente para ofrecer 4G LTE.

Además de estas frecuencias, también se encuentra la frecuencia no subastada conocida como banda L o banda 32 y que abarca las frecuencias desde 1452 MHz hasta 1492 MHz. Esta frecuencia es la de 1500 MHz [24].

Para este proyecto, la banda utilizada va a ser la 20, puesto que las antenas del proveedor del servicio de telecomunicaciones trabajan en dicha banda, además de encontrarnos en una zona rural, que a pesar de trabajar con radioenlaces, siempre tendrá mayor penetración que otras frecuencias mayores.

### 3.7.2. Estudio del tráfico demandado por los usuarios de la red

En este apartado vamos a analizar de forma estimada los requerimientos de los usuarios actuales suponiendo que se distribuyen uniformemente.

En primer lugar, partimos de la base de que el tráfico demandado será la suma de las tasas de los usuarios conectados que estén transmitiendo en un mismo momento. Dicha tasa, variará en función del punto de la celda en el que se encuentren, ya que los usuarios que estén más lejos requieren más recursos para tener la misma tasa de transmisión que aquellos otros situados cerca.

Vamos a suponer que la tasa de datos requerida de forma aproximada por usuario es de 40 Mbps como funcionamiento base. Esta consideración no se apoya en ninguna referencia, sino que se ha optado por este valor partiendo del valor aproximado de la suma de las posibles actividades en línea más comunes, que un usuario podría estar utilizando simultáneamente. De acuerdo con los datos recogidos en la Tabla 4, estas son: *streaming* de música (1 Mbps), navegación Web general, email, redes sociales (1.5 Mbps), chat de vídeo personal en HD (3 Mbps), descarga de archivos grandes (10 Mbps) y trabajo/educación a distancia (25 Mbps).

Actividad en línea	Velocidad de transmisión necesaria para 1-2 personas	Velocidad de transmisión necesaria para 3-4 personas
<i>Streaming</i> de música	1 Mbps	2 Mbps
Navegación web general, email, redes sociales	1.5 Mbps	3 Mbps
Chat de vídeo personal en HD (Skype, MS Teams, Zoom, etc.)	3 Mbps	6 Mbps
Transmisión de vídeos en SD ( <i>Standard Definition</i> )	4 Mbps	8 Mbps
Juegos en línea	4 Mbps	8 Mbps

(multijugador)		
Transmisión de vídeos en HD ( <i>High Definition</i> )	5-8 Mbps	10-16 Mbps
Videoconferencia en HD	6 Mbps	12 Mbps
Descarga de archivos grandes	10 Mbps	20 Mbps
Transmisión de vídeos en ultra HD 4K	25 Mbps	45 Mbps
Trabajo/educación a distancia	25 Mbps	45 Mbps

Tabla 4. Velocidad de transmisión según la actividad en línea [25].

### 3.7.3. Estudio de la capacidad de un eNodeB típico

En este apartado, vamos a realizar un estudio sobre las tasas de bit que ofrece un eNodeB típico en el enlace descendente considerando el ancho de banda correspondiente a la banda 20, empleado en LTE. Además, también tendremos que tener en cuenta los bloques de recurso disponibles en cada caso, así como otros aspectos que limitarán las tasas brutas como el CQI (*Continuous Quality Improvement*), *overhead* y eficiencia espectral.

En primer lugar, un 10% del ancho de banda es utilizado como banda de guarda para cualquier caso a excepción del de 1.4 MHz. Tras esto, tenemos que considerar el *overhead* y el indicador de calidad CQI puesto que tendrán un impacto en la capacidad final.

En [26] se expone que el *overhead* es necesario para gestionar información relativa a la señalización y control. Además, la sobrecarga producida por este, varía en función del canal, ancho de banda y técnica MIMO empleada, de la forma descrita a continuación:

- El PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) toma un símbolo de cada 14 símbolos que a su vez, es la mínima asignación posible. La sobrecarga dada por este se sitúa en torno al 7.1% (=1/14).
- Las señales de referencia RS (*Reference Signal*) emplean una proporción de símbolos del enlace descendente que dependen de la configuración de la antena. La transmisión sin MIMO utiliza 2 símbolos de cada 14 en cada tercera subportadora, para una configuración MIMO 2x2 utiliza 4 símbolos y para MIMO 4x4 utiliza 6 símbolos. Por tanto, existe una variación de entre 4.8% y 14.3% de la sobrecarga a pesar de que se solapa parcialmente con la del PDCCH.
- Por otro lado, también se consideran otros símbolos destinados a señales de sincronización PBCH (*Physical Broadcast Channel*), PCFICH (*Physical Control Format Indicator Channel*) y PHICH (*Physical Hybrid*

*ARQ Indicator Channel).* En este caso, la sobrecarga dependerá del ancho de banda empleado, variando desde menos de 1% para 20 MHz hasta un 9% para 1.4 MHz de forma aproximada.

- El PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*) no se incluye en el cálculo, ya que tiene una influencia negativa en la tasa de datos del enlace ascendente.

Teniendo en cuenta las características comentadas y las tasas de bits del enlace descendente que podemos ver en [26], nos decantamos por aplicar un 11% de *overhead* al cálculo de las velocidades de transmisión.

Si existe un enlace con una presencia considerable de interferencia o ruido, vamos a ver como disminuye la tasa neta porque disminuirá la tasa de bits por símbolo, para que de esta forma disminuya el número de errores en la comunicación. De esta forma podremos determinar la máxima modulación así como la tasa de códigos posibles, a través de la CQI, según la calidad de la señal que le llegue al UE.

Como podemos intuir, estos tres indicadores CSI están interconectados, por tanto, cualquier variación en uno de ellos afecta a los otros. Sin embargo, cabe destacar que la estación base sólo puede utilizar el informe CQI para adaptar el canal del enlace descendente para de esta forma, ser el único indicador que influya en los cálculos de tasas de bits netas a partir de los valores de la Tabla 5 que nos proporciona la eficiencia de bit por símbolo en función del valor de CQI que tendremos en la comunicación [27].

CQI index	modulation	code rate x 1024	efficiency
0	out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

Tabla 5. Índices de CQI [28].

Para realizar nuestro análisis, vamos a comenzar obteniendo la velocidad máxima de transferencia bruta para un ancho de banda total de 20 MHz en el enlace descendente teniendo en cuenta las 3 modulaciones posibles, es decir, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Antes de nada, tendremos que prescindir del 10% de recursos que no serán utilizados en concepto de banda de guarda, por tanto, los anchos de banda efectivos serían los siguientes:

<b>ANCHO DE BANDA TOTAL (MHz)</b>	<b>ANCHO DE BANDA ÚTIL (MHz)</b>
1.4	1.4 (no varía)
3	2.7
5	4.5
10	9
15	13.5
20	18

Tabla 6. BW total y útil.

Este dato es útil a la hora de conocer el número de bloques de recurso disponibles en cada caso, dividiendo el ancho de banda útil entre la cantidad del espectro ocupado por un bloque de recurso (180 kHz), tal y como figura en la Tabla 7:

<b>ANCHO DE BANDA ÚTIL (MHz)</b>	<b>Bloques de recurso disponibles</b>
1.4	6
2.7	15
4.5	25
9	50
13.5	75
18	100

Tabla 7. Cantidad de bloques de recursos asignados a cada BW.

El número de símbolos por segundo empleados en cada caso viene dado por el producto de cuatro valores: el número de bloques de recurso que varía en cada opción, el número de subportadoras por bloque de recursos que es 12, el número de símbolos OFDM por *slot* que es 7 y la cantidad de *slots* por unidad de tiempo que son dos en 1 ms.

Por otro lado, en lo que respecta a la utilización de MIMO, en el enlace la tendremos en cuenta a través de la eficiencia dada por el tipo de MIMO empleado: 1.74 en MIMO 2x2 y 3.26 en MIMO 4x4 [26].

Por último, el bit *rate* neto lo obtenemos como resultado del producto de la eficiencia de bit/símbolo calculada, del número de símbolos por segundo así como del porcentaje de ancho de banda útil que nos queda tras considerar el *overhead* del 89% [26]. A continuación vamos a proceder con los cálculos para la configuración MIMO 4x4. Además, cabe mencionar que según el tipo de modulación empleada, vamos a utilizar un CQI de 6 para QPSK, de 9 para 16-QAM así como de 15 para 64-QAM.

- **QPSK con MIMO 4x4, BW = 20 MHz y CQI = 6**

Al emplear 20 MHz tendremos 100 bloques de recurso disponibles, mientras que la tasa de código es 0.5879 (= 602/1024) para un CQI igual a 6 de acuerdo a la Tabla 5.

- **Número de símbolos por segundo:**

$$100 \text{ BR} \times 12 \text{ (subportadoras/BR)} \times 7 \text{ (símbolos/(slot x subportadora))} \times 2 \text{ (slots/ms)} = 16.8 \text{ Msímbolos/s}$$

- **Eficiencia de bit/símbolo:**

$$2 \text{ (bits/símbolo)} \times 0.5879 \text{ (tasa de código CQI)} \times 3.26 \text{ (eficiencia MIMO 4x4)} = 3.8331 \text{ bits/símbolo}$$

- **Tasa de bit neta:**

$$16.8 \text{ (Msímbolos/s)} \times 3.8331 \text{ (bits/símbolo)} \times 0.89 \text{ (overhead)} = \mathbf{57.31 \text{ Mbits/s}}$$

- **16-QAM con MIMO 4x4, BW = 20 MHz y CQI = 9**

Para este caso, un CQI de 9 posee una tasa de código de 0.6016 (= 616/1024).

- **Número de símbolos por segundo:**

$$100 \text{ BR} \times 12 \text{ (subportadoras/BR)} \times 7 \text{ (símbolos/(slot x subportadora))} \times 2 \text{ (slots/ms)} = 16.8 \text{ Msímbolos/s}$$

- **Eficiencia de bit/símbolo:**

$$4 \text{ (bits/símbolo)} \times 0.6016 \text{ (tasa de código CQI)} \times 3.26 \text{ (eficiencia MIMO 4x4)} = 7.8448 \text{ bits/símbolo}$$

- **Tasa de bit neta:**

$$16.8 \text{ (Msímbolos/s)} \times 7.8448 \text{ (bits/símbolo)} \times 0.89 \text{ (overhead)} = \mathbf{117.29 \text{ bits/s}}$$

- **64-QAM con MIMO 4x4, BW = 20 MHz y CQI = 15**

Para este caso, un CQI de 15 posee una tasa de código de 0.9258 (= 948/1024).

- **Número de símbolos por segundo:**  

$$100 \text{ BR} \times 12 \text{ (subportadoras/BR)} \times 7 \text{ (símbolos/(slot x subportadora))} \times 2 \text{ (slots/ms)} = 16.8 \text{ Msímbolos/s}$$
- **Eficiencia de bit/símbolo:**  

$$6 \text{ (bits/símbolo)} \times 0.9258 \text{ (tasa de código CQI)} \times 3.26 \text{ (eficiencia MIMO 4x4)} = 18.1086 \text{ bits/símbolo}$$
- **Tasa de bit neta:**  

$$16.8 \text{ (Msímbolos/s)} \times 18.1086 \text{ (bits/símbolo)} \times 0.89 \text{ (overhead)} = \textcolor{red}{270.76 \text{ Mbits/s}}$$

### 3.7.4. Balance de enlaces

El estudio del balance de los enlaces para determinar las pérdidas máximas que nos será posible asumir en nuestro análisis es necesario. A partir de esta información podremos determinar el radio máximo que tendrán las celdas del sistema, y a continuación calcular el número de estaciones base que necesitaremos desplegar para cubrir el área prevista.

Vamos a considerar tanto el enlace ascendente como el descendente considerando el ancho de banda correspondiente a la banda 20. También, vamos a considerar el balance para la frecuencia de interés 800 MHz, cuyas antenas compensan la ganancia con pérdidas menores presentes en los modelos de propagación de entorno rural.

El balance en el enlace descendente del estándar LTE posee varias similitudes respecto al de HSPA (*High Speed Packet Access*), mientras que el enlace ascendente presenta algunas diferencias como un margen de interferencia menor en LTE, carece de ganancia por diversidad además de desvanecimiento rápido [26].

En primer lugar, obtenemos las máximas pérdidas admisibles a través del uso de un ancho de banda de 360 kHz que equivale a dos bloques de recurso y una tasa de 64 kbps, tal y como se expone en [26]. En la tabla 8 se recogen los parámetros empleados en los cálculos para el enlace ascendente según la definición del estándar LTE.

Transmisor (UE)	
Potencia transmisión (dBm) - $P_{TX}$	23
Ganancia antena transmisión (dBi) - $G_{TX}$	0
Pérdidas por cuerpo (dB) - $L_{BODY}$	3
PIRE (dBm)	20
Receptor (eNodeB)	

Figura de ruido eNodeB (dB) - $N_F$	2
Ruido térmico (dBm) - $N_T$	-118.41
Ruido en el receptor (dBm) - $N_R$	-116.41
SINR (dB)	-7
Sensibilidad (dBm)	-123.41
Margen de interferencia (dB)	1
Pérdidas cable (dB)	2
Ganancia antena receptora (dBi)	17
Margen de desvanecimiento rápido (dB)	0
Ganancia por soft handover (dB)	0

Pérdidas máximas admisibles (dB) 159.41

Tabla 8. Balance del enlace ascendente para un BW = 360 kHz [26].

El parámetro de la potencia de transmisión empleado es un valor típico, máximo para la clase de potencia número 3. La ganancia de la antena transmisora depende de diferentes aspectos como el tipo de dispositivo o la banda de frecuencia empleada. En nuestro caso tendrá un valor de 0 dBi. Con el valor típico de 3 dB para las pérdidas por cuerpo, obtenemos la PIRE (Potencia Isótropa Radiada Equivalente) de la siguiente forma:

$$\text{PIRE (dBm)} = P_{tx} (\text{dBm}) + G_{tx} (\text{dB}) - L_{body} (\text{dB}) \quad (3)$$

El valor de la figura de ruido en la estación base depende del diseño de la red que en nuestro caso se ha considerado 2 dB. La asignación del ruido térmico estará ligada al ancho de banda empleado, de la misma forma que la temperatura y la constante de Boltzmann de acuerdo a la ecuación 4:

$$N_t (\text{dBm}) = 30 + 10 \log_{10} \left[ k \left( \frac{J}{K} \right) * T^{\alpha} (K) * BW_{\text{util}} (\text{Hz}) \right] \quad (4)$$

De forma análoga, el ruido en el receptor será obtenido utilizando los dos últimos coeficientes.

$$N_r (\text{dBm}) = N_t (\text{dBm}) + N_F (\text{dB}) \quad (5)$$

En el caso de la SINR, esta depende de la tasa de datos y del número de bloques de recurso asignados, por tanto, en nuestro caso valdrá -7 dB [26]. La SINR objetivo que se desea alcanzar permite hallar la sensibilidad usando la ecuación 6:

$$S (\text{dBm}) = \text{SINR (dB)} + N_r (\text{dBm}) \quad (6)$$

El margen de interferencia en LTE es ortogonal, por tanto no habrá interferencias dentro de una misma celda. Aun así, consideramos 1 dB para posibles interferencias de otras celdas. Del mismo modo, vamos a considerar una pérdidas de 2 dB en recepción y una ganancia de 17 dB para 800 MHz. En 3G se hace uso del acceso WCDMA que requiere de un control de potencia

para ambos enlaces, puesto que en este caso, el control de potencia de lazo cerrado es vital. Sin embargo, el uso de OFDMA en LTE implica la ausencia de este control rápido de potencia, por lo que no necesitaremos emplear un margen de desvanecimiento rápido ni tampoco tendrá consideración el *soft handover*. Sin embargo, a pesar de que en OFDMA este control de potencia no es tan necesario, en general sí que se realiza.

De la misma forma, en la tabla 9 tenemos el balance pero, en este caso, para el enlace descendente.

Transmisor (eNodeB)	
Potencia transmisión (dBm) / $P_{TX}$	46
Ganancia antena transmisión (dBi) / $G_{TX}$	17
Pérdidas por cuerpo (dB) / $L_{BODY}$	2
PIRE (dBm)	61
Receptor (UE)	
Figura de ruido UE (dB) / $N_F$	7
Ruido térmico (dBm) / $N_T$	-118.41
Ruido en recepción (dBm)	-111.41
SINR (dB)	-9
Sensibilidad (dBm)	-120.41
Margen de interferencia (dB) / $M_I$	5.5
Pérdidas por cuerpo (dB)	3
Ganancia antena receptora (dBi)	0
Overhead del canal de control (11%) (dB)	0.4

Pérdidas máximas admisibles (dB)	183.51
----------------------------------	--------

Tabla 9. Balance del enlace descendente para un BW = 10 MHz [26].

Una macro celda emplea una potencia típica que suele oscilar entre 43 y 48 dBm pero en nuestro caso vamos a utilizar 46 dBm. Para la ganancia y las pérdidas por cables de transmisión tendremos unos valores similares a los de la recepción del balance anterior. La PIRE vendrá dada por la ecuación 7:

$$\text{PIRE (dBm)} = P_{tx} (\text{dBm}) + G_{tx} (\text{dB}) - L_c (\text{dB}) \quad (7)$$

El terminal móvil tendrá una mayor figura de ruido que la de la estación base, considerando para este enlace un valor de 7 dB. La potencia de ruido térmico será hallada de la misma forma que en el enlace ascendente, con la única diferencia de que en este caso consideramos un ancho de banda útil de 9 MHz, con 50 bloques de recurso. Para este caso, el ruido en recepción también resulta de la suma de los dos anteriores. Vamos a tener en cuenta para este caso un valor de -9 dB para la SINR. Para calcular la sensibilidad, se aplicaría la misma fórmula que en el caso anterior, obteniendo un valor de -120.41 dBm. Con respecto al margen de interferencia, tenemos en cuenta la influencia de ruido causado por las células adyacentes, asumiendo una distribución del SINR medio del canal (factor geométrico o factor G) de - 4 dB.

$$M_I (\text{dB}) = 10 \log_{10} \left[ 1 + 10^{\left( -\frac{G_{\text{factor}}}{10} \right)} \right] \quad (8)$$

Las pérdidas por cuerpo y la ganancia en recepción son las indicadas en la Tabla 8. El uso en nuestro trabajo del 11% de *overhead* repercutirá con 0.4 dB. Al comparar las pérdidas máximas admisibles obtenidas en las Tablas 8 y 9 podemos ver que las del enlace ascendente son más desfavorables, teniendo un ancho de banda menor.

En la Tabla 10 vamos a considerar una variación del enlace ascendente para el ancho de banda usado en el enlace ascendente de 10 MHz.

Transmisor (UE)	
Potencia transmisión (dBm) - $P_{\text{TX}}$	23
Ganancia antena transmisión (dBi) - $G_{\text{TX}}$	0
Pérdidas por cuerpo (dB) - $L_{\text{BODY}}$	3
PIRE (dBm)	20
Receptor (eNodeB)	
Figura de ruido eNodeB (dB) - $N_F$	2
Ruido térmico (dBm) - $N_T$	-104.43
Ruido en el receptor (dBm) - $N_R$	-102.43
SINR (dB)	-9
Sensibilidad (dBm)	-111.43
Margen de interferencia (dB)	1
Pérdidas cable (dB)	2
Ganancia antena receptora (dBi)	17
Margen de desvanecimiento rápido (dB)	0
Ganancia por soft handover (dB)	0

Pérdidas máximas admisibles (dB) 147.43

Tabla 10. Balance del enlace ascendente con variación para un BW = 10 MHz [26].

Podemos ver que en este caso, se genera un resultado más desfavorable que el de la Tabla 8, donde también hemos calculado el balance del enlace ascendente pero con un ancho de banda de 360 kHz. Por este motivo vamos a utilizar este último enlace ascendente en *Xirio Online* más adelante, para estimar el número de estaciones base necesarias.

Para el dimensionamiento basado en pérdidas máximas que vamos a ver en el próximo apartado, vamos a utilizar el dato de las pérdidas máximas admisibles. Además, vamos a utilizar el valor de la sensibilidad recogido en la Tabla 10 para configurar la recepción en *Xirio Online* previamente al cálculo de las distintas coberturas.

### 3.7.5. Número de eNodeBs

Para nuestra planificación vamos a utilizar eNodeBs con sectorización triple, realizando los cálculos para un ancho de banda de 20 MHz y los valores de CQI 6, 9 y 15 de la misma forma que hemos hecho en el estudio de la capacidad de un eNodeB típico.

De esta forma, podremos calcular el número de eNodeBs en nuestro entorno rural mediante las pérdidas máximas que se pueden compensar en el balance del enlace. Respecto al dimensionamiento, lo plantearemos en torno a la tasa de datos requerida por el usuario.

Vamos a suponer que se quieren cubrir las necesidades de todos los usuarios con acceso a internet mediante 4G en el área escogida. Según un estudio del INE (Instituto Nacional de Estadística) del año 2020, el índice de población de la Región de Murcia con conexión de banda ancha móvil (acceso mediante un dispositivo de mano compatible con al menos 3G) es de un 85.2% [29]. Este valor será el punto de partida de nuestra planificación a la hora de estimar el número de usuarios a los que tendremos que brindar servicio, ya que no se han encontrado datos más específicos acerca del índice de penetración referente al 4G.

En nuestro caso, el análisis irá dirigido a los municipios de Cañada de la Cruz, Inazares y Calar de la Santa. Al considerar un entorno rural como parte del proyecto, debíamos escoger un lugar con una baja población, como es el caso de los municipios mencionados. La superficie de cada municipio es de 0.1254 km<sup>2</sup>, 0.0345 km<sup>2</sup> y 0.1218 km<sup>2</sup>, respectivamente, y la población de cada uno de ellos en el mismo orden es de 146, 27 y 167 habitantes según datos del año 2021 facilitados por el Centro Regional de Estadística de Murcia (CREM) [30].

Por tanto, considerando un índice de penetración de un 85.2%, nos quedarán una cantidad de usuarios con acceso a internet móvil aproximada de 124, 23 y 142, para cada municipio, respectivamente.

#### 3.7.5.1. Dimensionamiento basado en tasa de datos

Para desarrollar este subapartado, nos basaremos en la tasa requerida por el usuario. Esta tasa la establecemos de acuerdo a la tasa de datos requerida por usuario en el enlace descendente que hemos visto con más detalle en el apartado 3.7.2, es decir, 40 Megabits por segundo, puesto que no se puede realizar el dimensionamiento considerando la tasa de pico máxima de LTE. Como no todos los suscriptores estarán descargando datos al mismo tiempo de forma simultánea, sino que sólo algunos, vamos a considerar un factor de *overbooking* de valor típico de 20.

Para proceder con los cálculos pertinentes, vamos a partir de los valores de las capacidades de un eNodeB típico obtenidas en el apartado 3.7.3.

Además, vamos a enfocar nuestro dimensionamiento en un planteamiento con diferentes escenarios.

Por un lado, estimaremos el número de eNodeBs necesarios a partir de la tasa de datos requerida en función del porcentaje de usuarios conectados simultáneamente en algún momento de la hora pico.

Por otro lado, plantearemos diferentes tasas de datos en función del servicio requerido por un porcentaje determinado de usuarios en un momento específico del día.

Dicho esto, procedemos con los cálculos pertinentes:

➤ **Porcentaje determinado de la población con acceso a 4G se conecta simultáneamente en algún momento de la hora pico**

Como se trata de una zona rural, podemos estar asumiendo que el número de usuarios que se conectarán a la red 4G será más alto, ya que no tienen una red fija adecuada.

Así, para nuestro caso, vamos a plantear diferentes escenarios dependiendo del porcentaje de población con acceso a 4G que esté conectada simultáneamente en un momento determinado de la hora pico. A continuación podemos ver en detalle cada uno de los escenarios planteados:

**1. 30% de la población con acceso a 4G se conecta simultáneamente en un momento de la hora punta:**

Partimos de la capacidad conocida de 57.31 Megabits por segundo y del 30% de la población con acceso a 4G que sería de 38, 7 y 43 usuarios para Cañada de la Cruz, Inazares y Calar de la Santa, respectivamente.

- **QPSK con MIMO 4x4, BW = 20 MHz y CQI = 6**

- **Tasa requerida por usuario = 40 Mbit/seg**

$$57.31 \text{ (Mbits/seg/célula)} / 40 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = 2 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Factor de overbooking = 20**

$$2 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 40 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Número de personas servidas**

40 (usuarios / célula) x 3 (células / emplazamiento) = 120 (usuarios / emplazamiento)

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:** 38 (usuarios) / 120 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)
- **Inazares:** 7 (usuarios) / 120 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)
- **Calar de la Santa:** 43 (usuarios) / 120 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)
- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

88 (usuarios) / 120 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)

Ahora, tenemos que hacer lo propio para las modulaciones 16-QAM y 64-QAM, pero para no repetir los mismos cálculos, simplemente mencionar que tan solo varían las capacidades para ambas modulaciones, siendo 117.3 Mbps y 270.76 Mbps, respectivamente.

Cabe mencionar que para el resto de escenarios planteados, no se va a volver a repetir de nuevo esta breve explicación, ya que, es exactamente lo mismo, con la única variación del número de usuarios conectados. En cambio, se incluirá directamente la tabla con los valores correspondientes en cada escenario.

Por tanto, los resultados se recogen en la siguiente tabla:

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	38	1	1
Inazares	7	1	1
Calar de la Santa	43	1	1
Total	88	1	1

Tabla 11. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

## **2. 50% de la población con acceso a 4G se conecta simultáneamente en un momento de la hora punta:**

Partimos de la capacidad conocida de 57.31 Megabits por segundo y del 50% de la población con acceso a 4G que sería de 62, 12 y 71 usuarios para Cañada de la Cruz, Inazares y Calar de la Santa, respectivamente.

- **Tasa requerida por usuario = 40 Mbit/seg**

$$57.31 \text{ (Mbps/seg/célula)} / 40 \text{ (Mbps/seg/usuario)} = 2 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Factor de overbooking = 20**

$$2 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 40 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Número de personas servidas**

$$40 \text{ (usuarios / célula)} \times 3 \text{ (células / emplazamiento)} = 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)}$$

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:**  $62 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Inazares:**  $12 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Calar de la Santa:**  $71 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

$$145 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 2 \text{ (eNodeBs)}$$

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	62	1	1
Inazares	12	1	1
Calar de la Santa	71	1	1
Total	145	1	1

Tabla 12. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

### **3. 70% de la población con acceso a 4G se conecta simultáneamente en un momento de la hora punta:**

Partimos de la capacidad conocida de 57.31 Megabits por segundo y del 70% de la población con acceso a 4G que sería de 87, 17 y 100 para Cañada de la Cruz, Inazares y Calar de la Santa, respectivamente.

- **Tasa requerida por usuario = 40 Mbit/seg**

$$57.31 \text{ (Mbits/seg/célula)} / 40 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = 2 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Factor de overbooking = 20**

$$2 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 40 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Número de personas servidas**

$$40 \text{ (usuarios / célula)} \times 3 \text{ (células / emplazamiento)} = 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)}$$

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:**  $87 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Inazares:**  $17 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Calar de la Santa:**  $100 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

$$204 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 2 \text{ (eNodeBs)}$$

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	87	1	1
Inazares	17	1	1
Calar de la Santa	100	1	1
Total	204	2	1

Tabla 13. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

#### **4. 90% de la población con acceso a 4G se conecta simultáneamente en un momento de la hora punta:**

Partimos de la capacidad conocida de 57.31 Megabits por segundo y del 90% de la población con acceso a 4G que sería de 112, 21 y 128 usuarios para Cañada de la Cruz, Inazares y Calar de la Santa, respectivamente.

- **Tasa requerida por usuario = 40 Mbit/seg**

$$57.31 \text{ (Mbits/seg/célula)} / 40 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = 2 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Factor de overbooking = 20**

$$2 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 40 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Número de personas servidas**

$$40 \text{ (usuarios / célula)} \times 3 \text{ (células / emplazamiento)} = 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)}$$

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:**  $112 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Inazares:**  $21 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Calar de la Santa:**  $128 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 2 \text{ (eNodeBs)}$

- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

$$261 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 3 \text{ (eNodeBs)}$$

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	112	1	1
Inazares	21	1	1
Calar de la Santa	128	1	1
Total	261	2	1

Tabla 14. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total 16-QAM y 64-QAM.

Con esto, damos por finalizado el primer planteamiento y, es interesante observar cómo aumenta el número de eNodeBs necesarios, a la vez que el porcentaje de población con acceso a 4G que se conecta simultáneamente en un momento de la hora punta es mayor, es decir, de alguna forma, ambas variables son directamente proporcionales.

Esto tiene sentido, puesto que al aumentar el número de usuarios que utilizan este servicio, la tasa de datos total requerida es mayor y, por tanto, el número de eNodeBs necesarios para cumplir dichos requisitos, también será mayor.

A continuación, vamos a plantear diferentes escenarios en función del porcentaje de la población con acceso a 4G que de forma simultánea, se conectan en algún momento del día para usar unos servicios específicos que harán variar la tasa de datos por usuario requerida.

➤ **Un porcentaje determinado de la población con acceso a 4G se conecta simultáneamente en algún momento del día para el uso de unos servicios en particular**

En este segundo escenario, partimos de que un 85.2% tiene acceso a conexión 4G, de acuerdo a la asunción que hemos hecho anteriormente. A partir de esto, vamos a considerar distintos escenarios con distintas demandas en función del servicio utilizado, a partir de los valores recogidos en la Tabla 4.

Vamos a suponer un porcentaje determinado de usuarios conectados de forma simultánea durante la mañana, la tarde y la noche. Una vez definimos esto, veremos qué porcentaje de servicios son demandados en función del momento del día en el que nos encontremos.

**1. Primer escenario: 40% de los usuarios con acceso a 4G están conectados por la mañana:**

En un día laboral normal, el porcentaje de usuarios conectados por la mañana es menor que en otros momentos del día, puesto que hay ciertos trabajos como la agricultura, donde el uso de internet está muy limitado a ciertos momentos, como una pausa de descanso, o los estudiantes de enseñanza obligatoria están en sus respectivos centros educativos donde apenas pueden conectarse. Además, para cada escenario planteado en este apartado, se han tenido en cuenta las condiciones en un área rural con respecto a una gran ciudad, en términos de los servicios requeridos por los usuarios. Por esto, se ha considerado un 40% de usuarios conectados, en otras palabras, 50, 10 y 57 usuarios estarían conectado en este momento del día para los municipios de Cañada de la Cruz, Inazares y Calar de la Santa, respectivamente.

A continuación, vamos a estudiar el número de eNodeBs necesarios en función de los servicios requeridos:

- **25% de los usuarios requieren navegación web general / email / redes sociales, es decir, 1.5 Mbps que redondeamos a 2 Mbps.**

Partimos de la capacidad conocida de 57.3 Megabits por segundo, así como del 25% de usuarios utilizando este servicio, del 40% conectado, estos son 13, 3 y 15 usuarios, para cada uno de los municipios en el orden comentado.

- **Tasa requerida por usuario = 2 Mbit/seg**

$$57.31 \text{ (Mbps/célula)} / 2 \text{ (Mbps/usuario)} = 29 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Factor de overbooking = 20**

$$29 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 580 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Número de personas servidas**

$$580 \text{ (usuarios / célula)} \times 3 \text{ (células / emplazamiento)} = 1740 \text{ (usuarios / emplazamiento)}$$

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:**  $13 \text{ (usuarios)} / 1740 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Inazares:**  $3 \text{ (usuarios)} / 1740 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Calar de la Santa:**  $15 \text{ (usuarios)} / 1740 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

$$31 \text{ (usuarios)} / 1740 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$$

Ahora, tenemos que hacer lo propio para las modulaciones 16-QAM y 64-QAM, pero para no repetir los mismos cálculos, simplemente mencionar que tan solo varían las capacidades para ambas modulaciones, siendo 117.3 Mbps y 270.76 Mbps, respectivamente.

Cabe mencionar que para el resto de escenarios planteados, no se va a volver a repetir de nuevo esta breve explicación, ya que, es exactamente lo mismo. En cambio, se incluirá directamente la tabla con los valores correspondientes en cada escenario.

Por tanto, los resultados se recogen en la siguiente tabla:

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de	13	1	1

la Cruz			
Inazares	3	1	1
Calar de la Santa	15	1	1
Total	31	1	1

Tabla 15. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

- **10% de los usuarios requieren navegación web general / email / redes sociales, videoconferencia en HD y descarga de archivos grandes, es decir, 17.5 Mbps que redondeamos a 18 Mbps.**

Partimos de la capacidad conocida de 57.3 Megabits por segundo, así como del 10% de usuarios utilizando este servicio, del 40% conectado, estos son 5, 1 y 6 usuarios, para cada uno de los municipios en el orden comentado.

- **Tasa requerida por usuario = 18 Mbit/seg**

$$57.31 \text{ (Mbits/seg/célula)} / 18 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = 4 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Factor de overbooking = 20**

$$4 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 80 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Número de personas servidas**

$$80 \text{ (usuarios / célula)} \times 3 \text{ (células / emplazamiento)} = 240 \text{ (usuarios / emplazamiento)}$$

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:**  $5 \text{ (usuarios)} / 240 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Inazares:**  $1 \text{ (usuario)} / 240 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Calar de la Santa:**  $6 \text{ (usuarios)} / 240 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

$$12 \text{ (usuarios)} / 240 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$$

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	5	1	1
Inazares	1	1	1

Calar de la Santa	6	1	1
Total	12	1	1

Tabla 16. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

- **5% de los usuarios requieren navegación web general / email / redes sociales, videoconferencia en HD, descarga de archivos grandes y trabajo/educación a distancia, es decir, 42.5 Mbps que redondeamos a 43 Mbps.**

Partimos de la capacidad conocida de 57.3 Megabits por segundo, así como del 5% de usuarios utilizando este servicio, del 40% conectado, estos son 3, 1 y 3 usuarios, para cada uno de los municipios en el orden comentado.

- **Tasa requerida por usuario = 43 Mbit/seg**

$$57.31 \text{ (Mbps/célula)} / 43 \text{ (Mbps/usuario)} = 2 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Factor de overbooking = 20**

$$2 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 40 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Número de personas servidas**

$$40 \text{ (usuarios / célula)} \times 3 \text{ (células / emplazamiento)} = 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)}$$

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:**  $3 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Inazares:**  $1 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Calar de la Santa:**  $3 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

$$7 \text{ (usuarios)} / 120 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeBs)}$$

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	3	1	1
Inazares	1	1	1
Calar de la Santa	3	1	1

Total	7	1	1
-------	---	---	---

Tabla 17. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

## 2. Segundo escenario: 60% de los usuarios con acceso a 4G están conectados por la tarde:

En un día laboral normal, el porcentaje de usuarios conectados por la tarde es mayor que por la mañana, puesto que mucha gente está de vuelta en casa tras la jornada laboral o docente en el caso de los estudiantes de enseñanza obligatoria, pero en este momento del día no toda la gente ha terminado su rutina. Por esto, el porcentaje de usuarios conectados se considera mayor que por la mañana, siendo de un 60%, en otras palabras, 75, 14 y 86 usuarios estarían conectados en este momento del día para los municipios de Cañada de la Cruz, Inazares y Calar de la Santa, respectivamente.

A continuación, vamos a estudiar el número de eNodeBs necesarios en función de los servicios requeridos:

- 30% de los usuarios requieren navegación web general / email / redes sociales, es decir, 1.5 Mbps que redondeamos a 2 Mbps.

Partimos de la capacidad conocida de 57.3 Megabits por segundo, así como del 30% de usuarios utilizando este servicio, del 60% conectados, estos son 23, 5 y 26 usuarios, para cada uno de los municipios en el orden comentado.

- Tasa requerida por usuario = 2 Mbit/seg

$$57.31 \text{ (Mbits/seg/célula)} / 2 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = 29 \text{ (usuarios / célula)}$$

- Factor de overbooking = 20

$$29 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 580 \text{ (usuarios / célula)}$$

- Número de personas servidas

$$580 \text{ (usuarios / célula)} \times 3 \text{ (células / emplazamiento)} = 1740 \text{ (usuarios / emplazamiento)}$$

- eNodeBs necesarios por municipio:

- Cañada de la cruz: 23 (usuarios) / 1740 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)
- Inazares: 5 (usuarios) / 1740 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)
- Calar de la Santa: 26 (usuarios) / 1740 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)

- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

$$54 \text{ (usuarios) / } 1740 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$$

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	13	1	1
Inazares	3	1	1
Calar de la Santa	15	1	1
<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

Tabla 18. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

- **20% de los usuarios requieren navegación web general / email / redes sociales, streaming de música y transmisión de videos en SD , es decir, 4.5 Mbps que redondeamos a 5 Mbps.**

Partimos de la capacidad conocida de 57.3 Megabits por segundo, así como del 20% de usuarios utilizando este servicio, del 40% conectado, estos son 15, 3 y 18 usuarios, para cada uno de los municipios en el orden comentado.

- **Tasa requerida por usuario = 5 Mbit/seg**

$$57.31 \text{ (Mbits/seg/célula) / } 5 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = 12 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Factor de overbooking = 20**

$$12 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 240 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Número de personas servidas**

$$240 \text{ (usuarios / célula)} \times 3 \text{ (células / emplazamiento)} = 720 \text{ (usuarios / emplazamiento)}$$

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:**  $15 \text{ (usuarios) / } 720 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Inazares:**  $3 \text{ (usuario) / } 720 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Calar de la Santa:**  $18 \text{ (usuarios) / } 720 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

$$36 \text{ (usuarios)} / 720 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$$

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	15	1	1
Inazares	3	1	1
Calar de la Santa	18	1	1
Total	36	1	1

Tabla 19. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

- **10% de los usuarios requieren navegación web general / email / redes sociales, streaming de música, juegos en línea y chat de vídeo personal, es decir, 9.5 Mbps que redondeamos a 10 Mbps.**

Partimos de la capacidad conocida de 57.3 Megabits por segundo, así como del 10% de usuarios utilizando este servicio, del 60% conectado, estos son 8, 2 y 9, para cada uno de los municipios en el orden comentado.

- **Tasa requerida por usuario = 10 Mbit/seg**

$$57.31 \text{ (Mbits/seg/célula)} / 10 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = 6 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Factor de overbooking = 20**

$$6 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 120 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Número de personas servidas**

$$120 \text{ (usuarios / célula)} \times 3 \text{ (células / emplazamiento)} = 360 \text{ (usuarios / emplazamiento)}$$

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:**  $8 \text{ (usuarios)} / 360 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Inazares:**  $2 \text{ (usuarios)} / 360 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **Calar de la Santa:**  $9 \text{ (usuarios)} / 360 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

$$19 \text{ (usuarios) / } 360 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeBs)}$$

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	8	1	1
Inazares	2	1	1
Calar de la Santa	9	1	1
Total	19	1	1

Tabla 20. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

### 3. **Tercer escenario: 80% de los usuarios con acceso a 4G están conectados por la noche:**

En un día laboral normal, el porcentaje de usuarios conectados por la noche es mayor que por la tarde, ya que, en este momento del día, prácticamente el 100% de todas las personas han finalizado su jornada, están de vuelta en casa y, a priori, disponen de algo más de tiempo libre. Por esto, el porcentaje de usuarios conectados se considera el mayor del día con un 80% de usuarios conectados, en otras palabras, 100, 19 y 114 usuarios estarían conectados en este momento del día para los municipios de Cañada de la Cruz, Inazares y Calar de la Santa, respectivamente.

A continuación, vamos a estudiar el número de eNodeBs necesarios en función de los servicios requeridos:

- **60% de los usuarios requieren navegación web general / email / redes sociales y chat de vídeo personal en HD, es decir, 2.5 Mbps que redondeamos a 3 Mbps.**

Partimos de la capacidad conocida de 57.3 Megabits por segundo, así como del 60% de usuarios utilizando este servicio, del 80% conectados, estos son 60, 12 y 69, para cada uno de los municipios en el orden comentado.

- **Tasa requerida por usuario = 3 Mbit/seg**

$$57.31 \text{ (Mbits/seg/célula) / } 3 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = 20 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Factor de overbooking = 20**

$$20 \text{ (usuarios / célula) x } 20 = 400 \text{ (usuarios / célula)}$$

- **Número de personas servidas**  
 $400 \text{ (usuarios / célula)} \times 3 \text{ (células / emplazamiento)} = 1200 \text{ (usuarios / emplazamiento)}$
- **eNodeBs necesarios por municipio:**
- **Cañada de la cruz:**  $60 \text{ (usuarios) / } 1200 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$
- **Inazares:**  $12 \text{ (usuarios) / } 1200 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$
- **Calar de la Santa:**  $69 \text{ (usuarios) / } 1200 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$
- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**  
 $54 \text{ (usuarios) / } 1200 \text{ (usuarios / emplazamiento)} = 1 \text{ (eNodeB)}$

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	60	1	1
Inazares	12	1	1
Calar de la Santa	69	1	1
Total	141	1	1

Tabla 21. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

- **15% de los usuarios requieren navegación web general / email / redes sociales y streaming de música, es decir, 2.5 Mbps que redondeamos a 3 Mbps.**

Partimos de la capacidad conocida de 57.3 Megabits por segundo, así como del 15% de usuarios utilizando este servicio, del 80% conectado, estos son 15, 3 y 18, para cada uno de los municipios en el orden comentado.

- **Tasa requerida por usuario = 3 Mbit/seg**  
 $57.31 \text{ (Mbits/seg/célula)} / 3 \text{ (Mbits/seg/usuario)} = 20 \text{ (usuarios / célula)}$
- **Factor de overbooking = 20**  
 $20 \text{ (usuarios / célula)} \times 20 = 400 \text{ (usuarios / célula)}$

- **Número de personas servidas**

400 (usuarios / célula) x 3 (células / emplazamiento) = 1200 (usuarios / emplazamiento)

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:** 15 (usuarios) / 1200 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)
- **Inazares:** 3 (usuario) / 1200 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)
- **Calar de la Santa:** 18 (usuarios) / 1200 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)
- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

36 (usuarios) / 1200 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	15	1	1
Inazares	3	1	1
Calar de la Santa	18	1	1
Total	36	1	1

Tabla 22. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

- **5% de los usuarios requieren navegación web general / email / redes sociales y educación a distancia, es decir, 26.5 Mbps que redondeamos a 27 Mbps.**

Partimos de la capacidad conocida de 57.3 Megabits por segundo, así como del 5% de usuarios utilizando este servicio, del 80% conectado, estos son 5, 1 y 6, para cada uno de los municipios en el orden comentado.

- **Tasa requerida por usuario = 27 Mbit/seg**

57.31 (Mbits/seg/célula) / 27 (Mbits/seg/usuario) = 3 (usuarios / célula)

- **Factor de overbooking = 20**

3 (usuarios / célula) x 20 = 60 (usuarios / célula)

- **Número de personas servidas**

60 (usuarios / célula) x 3 (células / emplazamiento) = 180 (usuarios / emplazamiento)

- **eNodeBs necesarios por municipio:**

- **Cañada de la cruz:** 5 (usuarios) / 180 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)

- **Inazares:** 1 (usuarios) / 180 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)

- **Calar de la Santa:** 6 (usuarios) / 180 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)

- **eNodeBs necesarios para todos los municipios:**

12 (usuarios) / 180 (usuarios / emplazamiento) = 1 (eNodeB)

Municipio	Población	Total eNodeBs 16-QAM	Total eNodeBs 64-QAM
Cañada de la Cruz	5	1	1
Inazares	1	1	1
Calar de la Santa	6	1	1
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

Tabla 23. Número de eNodeBs necesarios por municipio y población total para 16-QAM y 64-QAM.

Es interesante observar que en todos los casos tenemos tan solo un eNodeB requerido. Esto tiene sentido, ya que estamos realizando los cálculos con un número de usuarios bastante reducido, teniendo en cuenta las características de los escenarios planteados.

A diferencia del planteamiento anterior donde veíamos como el número de eNodeBs variaba en función del tipo de modulación y número de usuarios, en este caso, no sucede lo mismo.

### 3.7.5.2. Dimensionamiento según pérdidas máximas

Este método nos permitirá determinar de cuántos eNodeBs precisamos cuando las bases del cálculo son las pérdidas máximas presentes en el enlace descendente.

En primer lugar, vamos a obtener el radio de cobertura de los emplazamientos con ayuda de *Xirio Online*, en el medio rural donde se encuentran localizados nuestros municipios para observar la superficie que son capaces de abarcar.

Para poder realizar el cálculo, de cobertura en *Xirio Online*, equivalente al que se realizaría en el caso de poder incluir todos los elementos considerados en el balance del enlace del apartado 3.7.5, vamos a definir una sensibilidad igual a las pérdidas máximas admisibles y anularemos el resto de términos. En dicho apartado hemos obtenido un valor mínimo de pérdidas igual a 147.43 dB, por lo que la sensibilidad que nosotros definiremos será de -147.43 dBm. El resto de las variables las definiremos con valor nulo, estas son la PIRE, las ganancias de las antenas y las pérdidas en recepción.

Además de esto, indicaremos que el emplazamiento tiene una altura de 40 metros para que la antena proporcione un rendimiento mayor y así cubrir distancias más largas. Además, para el modelo de Okumura - Hata se considera una altura de la antena transmisora de entre 30-200 m, pero en un entorno de estas características, la altura habitual es de unos 12 – 50 metros. Por todo esto, se considera dicha altura idónea para nuestro entorno rural.

De la misma forma, consideramos una altura de 1.5 metros en recepción y en transmisión colocamos una antena con tres sectores.

Existe la posibilidad de configurar los rangos de señal cambiando los colores que representan los niveles de señal para diferenciarlos mejor.

En la ilustración 22, el color azul indica que la señal recibida si sitúa entre -112 dBm y -102 dBm, el color negro que la potencia de señal recibida es intermedia para un intervalo que oscila entre los -102 dBm y -92 dBm, y el color verde oscuro indica que la señal es muy buena, siendo la RSRP (*Reference Signal Received Power*) de – 92 dBm a infinito.

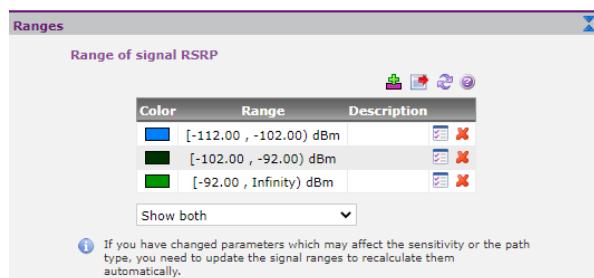


Ilustración 20. Códigos de colores simulación *Xirio Online*.

En la siguiente ilustración, podemos ver el resultado obtenido de la simulación por pérdidas máximas, utilizando tan solo un eNodeB:



Ilustración 21. Cobertura en el área seleccionada con Xirio Online a partir de las pérdidas máximas.

Podemos observar como con un único emplazamiento damos servicio a los 3 municipios de interés, los cuales se encuentran marcados en el mapa con una bandera naranja. Sin embargo, en el municipio de Calar de la Santa (situado al norte), la señal llega más debilitada, ya que, como podemos ver en la Ilustración 21, el segundo umbral de señal recibida cae dentro de algunas zonas de su término municipal.

Para solventar este problema, vamos a implementar un segundo emplazamiento que expanda la cobertura hacia dicho municipio y que estará conectado directamente con el eNodeB1.

En la ilustración 22 podemos comprobar que en este caso, implementando un segundo eNodeB en la zona norte del área rural seleccionada, se cumplen los requerimientos mediante pérdidas máximas en términos de cobertura.

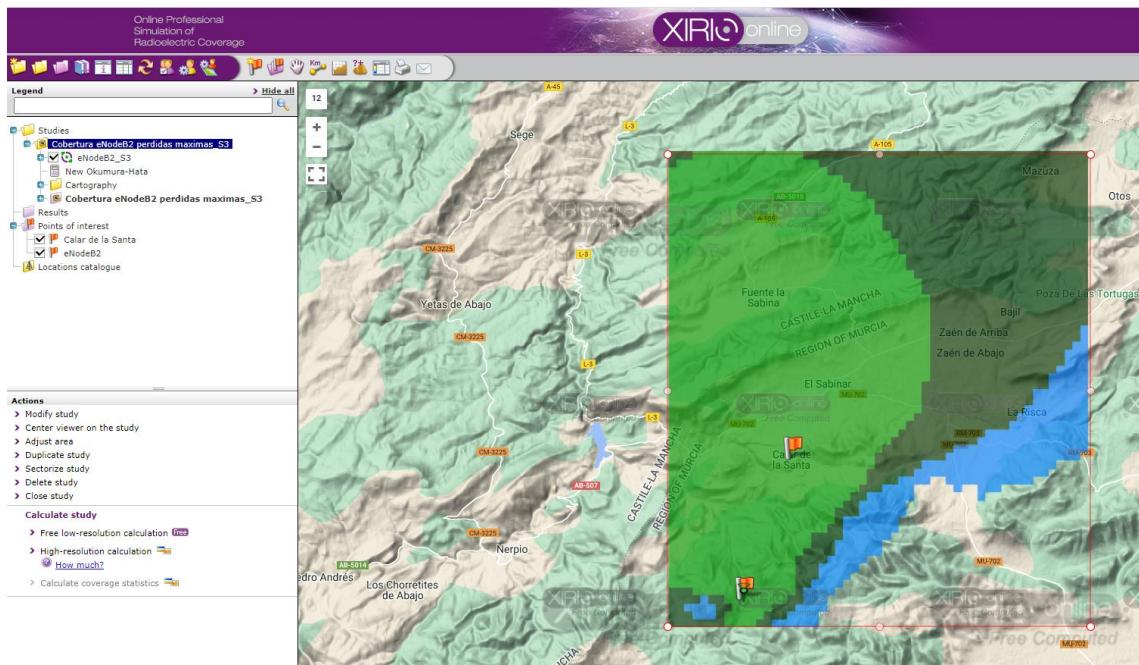


Ilustración 22. Cobertura del eNodeB2 con Xirio Online por el método de pérdidas máximas.

Por tanto, mediante este método, podemos decir que con dos emplazamientos seremos capaces de dar servicio a los 3 municipios de interés.

En la siguiente ilustración obtenemos una muestra visual obtenida con *Google Maps* de las localizaciones a estudiar. Donde la suma de las superficies es aproximadamente de  $0.2816 \text{ km}^2$ .



Ilustración 23. De izquierda a derecha: área en  $\text{m}^2$  de Cañada de la Cruz, Inazares y Calar de la Santa.

Tal y como hemos podido comprobar en la imagen 21, un único eNodeB no será suficiente para cumplir nuestro cometido. Por tanto, el número de estaciones base obtenido no será igual al obtenido en los casos considerados en los anteriores dimensionamientos, donde hemos visto que en su mayoría, tan solo un eNodeB era necesario.

### 3.8. Estudio de la ubicación óptima de los eNodeBs

En este apartado mostramos el resultado final de todo el proceso que conlleva la planificación de una red de estas características, la ubicación de las estaciones base de nuestros sistemas.

Mediante los modelos de propagación, podemos realizar una estimación de las pérdidas que tendremos presentes en nuestra comunicación. En función de las características orográficas del área de interés, haremos uso de unos u otros modelos. Para nuestro caso, como tenemos un entorno rural, nos hemos decantado por el uso del modelo de Okumura – Hata que intervendrá directamente en las simulaciones llevadas a cabo en *Xirio Online*.

#### 3.8.1. Estudio de la orografía

Previamente a realizar la simulación mediante el método comentado, tenemos que analizar cuál es la mejor ubicación para ambas estaciones base.

Como nos encontramos en un área rural, donde abunda el terreno montañoso, se ha estudiado la zona para identificar los 2 puntos más idóneos para ubicar ambos eNodeBs.

Por un lado, se ha buscado una posible localización donde, a priori, un eNodeB tuviera conexión directa con el emplazamiento de telecomunicaciones de la empresa proveedora del servicio y que, a su vez pudiera conectarse con los usuarios finales situados en los municipios de Cañada de la Cruz e Inazares. Por otro lado, respecto a la ubicación del segundo eNodeB, se ha buscado una posible localización donde pudiera existir conexión directa con el primer eNodeB así como con los usuarios finales localizados en el municipio de Calar de la Santa.

En la siguiente ilustración, podemos ver el perfil orográfico entre los municipios de Cañada de la Cruz e Inazares, donde se puede observar perfectamente la elevación entre ambos.

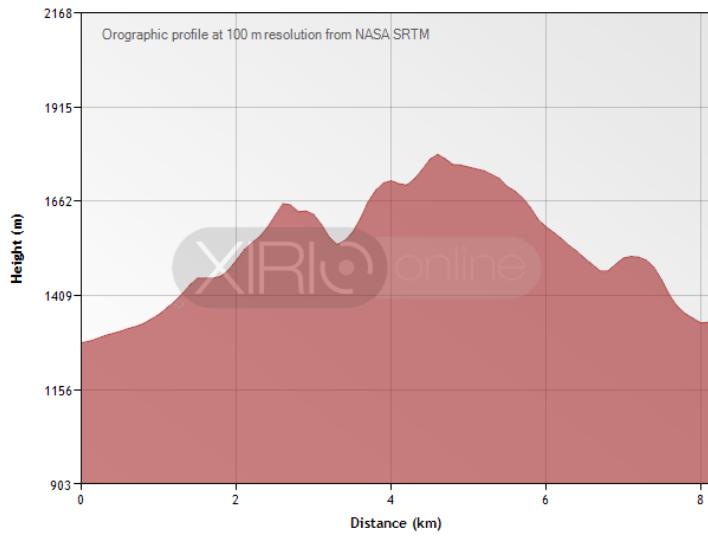


Ilustración 24. Perfil orográfico entre Cañada de la Cruz e Inazares con Xirio Online.

Claramente, esta elevación entre ambos municipios es un claro candidato para ubicar el primer eNodeB, ya que, además, existiría conexión directa con el emplazamiento de la empresa proveedora del servicio.

De forma análoga, en la siguiente ilustración, se ha analizado el perfil orográfico entre la posible ubicación del eNodeB1 y el municipio de Calar de la Santa, donde podemos observar que la señal llegaría atenuada debido a ciertas elevaciones del terreno entre ambos puntos que tendrían una repercusión negativa en la propagación de la señal. Por tanto, sería interesante instalar un segundo eNodeB entre ambas localizaciones.

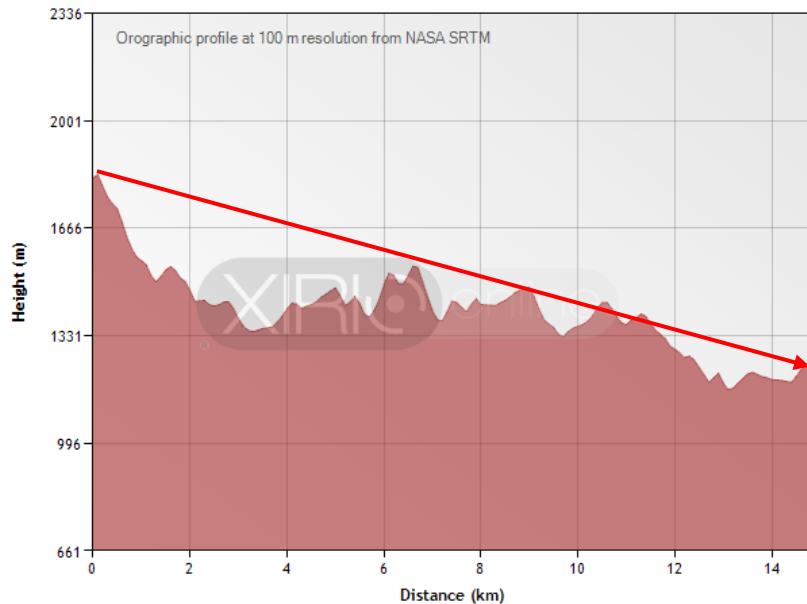


Ilustración 25. Perfil orográfico entre el eNodeB1 y Calar de la Santa con Xirio Online.

Tras esto, podemos considerar que ya tenemos 2 posibles ubicaciones para cada uno de nuestros eNodeBs que cumplirían con las condiciones establecidas.

En la siguiente ilustración, podemos ver tanto el perfil orográfico entre el eNodeB1 que hemos situado en la elevación comentada en la Ilustración 24 y el eNodeB2, situado en el punto más crítico que hemos visto en la Ilustración 25.

También, podemos encontrar el perfil orográfico entre el eNodeB2 y el municipio de Calar de la Santa, donde podemos observar que las ubicaciones escogidas para ambos eNodeBs son idóneas, ya que se sitúan en elevaciones del terreno estratégicas que permiten comunicar directamente los elementos clave de la red.

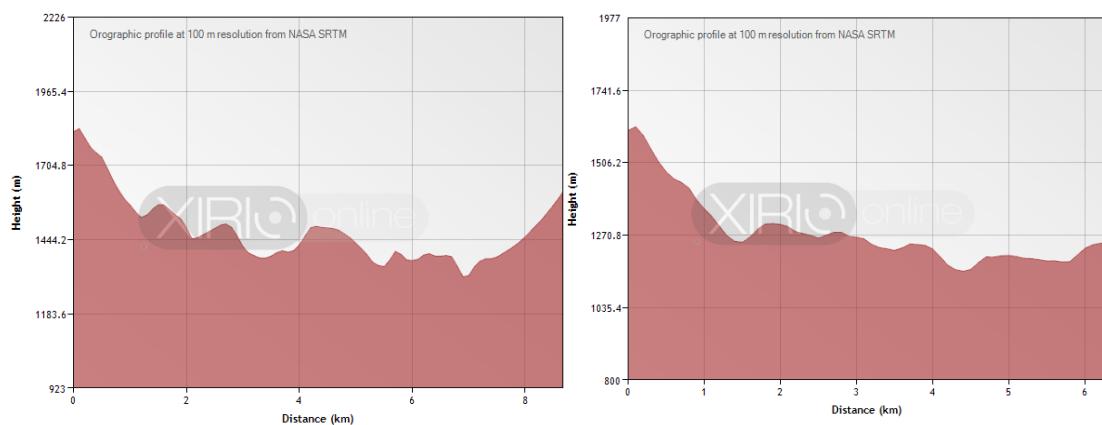


Ilustración 26. De izquierda a derecha: perfiles orográficos entre el eNodeB1 – eNodeB2 y el eNodeB2 – Calar de la Santa, respectivamente, con Xirio Online.

Finalmente, en base a este estudio orográfico, se llega a la conclusión de que las ubicaciones idóneas de ambos eNodeBs para dar servicio a cada uno de los municipios son las recogidas en la siguiente tabla:

Coordenadas		
Estación base	Latitud	Longitud
eNodeB1	38°03'10"N	002°13'38"W
eNodeB2	38°07'41.96"N	002°12'09.28"W

Tabla 24. Coordenadas de la ubicación de ambos eNodeBs.

Para poder visualizar con mayor detalle la localización de los elementos relevantes de nuestra red, en la siguiente imagen se ha representado la orografía de los elementos, cuyos detalles veremos más adelante, en modo satélite en 3D con *Google Earth*:



Ilustración 27. Orografía elementos red 4G propuesta en 3D con *Google Earth*.

Cabe mencionar que en la ilustración anterior, los elementos no se han unido , simplemente es una representación para visualizar la orografía en torno a dichos puntos clave de nuestra red 4G propuesta, ya que, los usuarios del municipio de Cañada de la Cruz no pueden conectarse directamente al emplazamiento, sino que lo harán a través del eNodeB1.

### 3.8.2. Ubicación basada en el uso del modelo de propagación de Okumura - Hata

Tal y como hemos comentado, para los escenarios considerados, el número de eNodeBs en el mejor de los casos es de uno.

Sin embargo, este número no coincidía con el número de eNodeBs obtenido en todos los escenarios considerados. Por tanto, realizaremos dos despliegues que serán válidos para las tres configuraciones estipuladas.

Haremos uso del modelo de propagación Okumura – Hata.

Al tener dos emplazamientos, emplearemos dos eNodeBs cuyo diagrama de radiación es sectorial, de manera que aumentamos la ganancia para de esta forma poder conectar más equipos y más lejos del emisor.

Los valores empleados para cada emplazamiento se extraen de la Tabla 10, es decir, el enlace más desfavorable, cuyos valores quedan recogidos en la siguiente Tabla:

PIRE (dBm)	20
Pérdidas en recepción ( $L_r$ ) (dB)	3
Ganancia en recepción ( $G_r$ ) (dB)	17
Sensibilidad (S) (dBm)	-111.435
Altura eNodeB ( $h_{tx}$ ) (m)	40

Tabla 25. Valores utilizados para el emplazamiento.

Las pérdidas de recepción se asignan a 3 dB porque lo tomamos como la suma de las pérdidas en el cable (2 dB) y el margen de interferencia (1 dB).

De forma análoga, la configuración realizada en *Xirio Online* para ambos emplazamientos es la que aparece en la Tabla 26.

Estación base	Sector	Acimut ( $\varphi$ )	Elevación ( $\phi$ )	$H_{TX}$ (m)	PIRE (dBm)	$G_r$ (dB)	$L_r$ (dB)	S (dBm)
eNodeB1 y eNodeB2	1	0°	0°	40	20	17	3	-111.435
	2	120°	0°	40	20	17	3	-111.435
	3	240°	0°	40	20	17	3	-111.435

Tabla 26. Configuración antena sectorial en *Xirio Online*.

De forma similar a como hemos hecho en el análisis mediante pérdidas máximas, en primer lugar, vamos a estudiar la cobertura presentada por el primer emplazamiento. De este modo vamos a corroborar que son necesarios ambos eNodeBs. Este hecho podemos comprobarlo en la Ilustración 28.

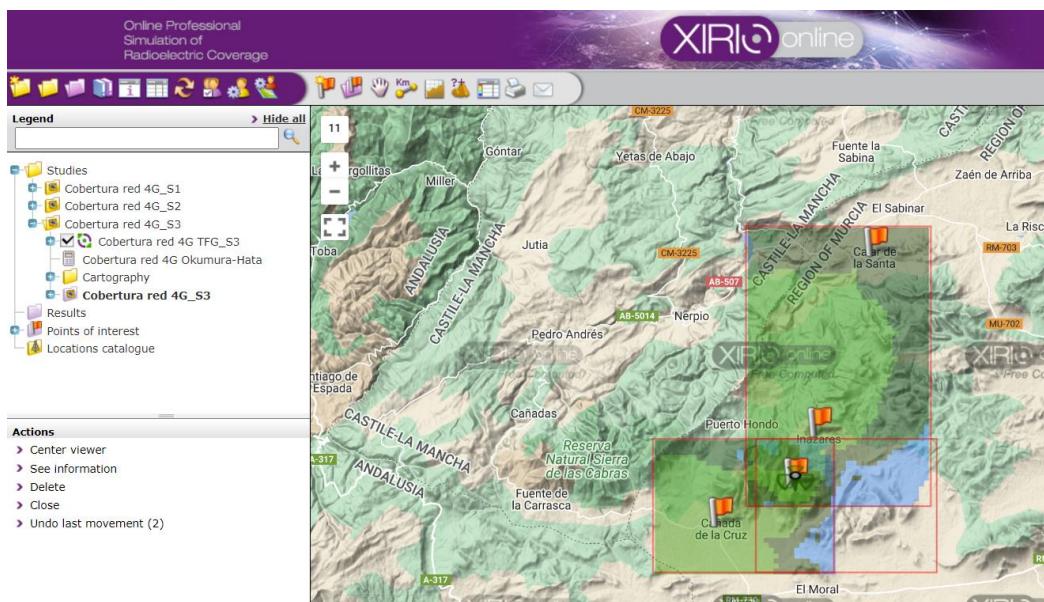


Ilustración 28. Cobertura total proporcionada por el sistema con Okumura – Hata con *Xirio Online*.

En la ilustración anterior se observa que los municipios marcados por una bandera naranja, son cubiertos por el eNodeB1 desplegado, sin embargo, vemos que la señal llega debilitada al municipio de Calar de la Santa, con niveles de señal en recepción incluso menores que los obtenidos mediante el método de pérdidas. Para solventar este problema, vamos a implementar un segundo eNodeB cuya ubicación se ha especificado en la tabla 24.

La configuración realizada en *Xirio Online* para este emplazamiento es la misma que aparece en la Tabla 26.

Por tanto, el área de cobertura presentada por el segundo emplazamiento requerido para este análisis aparece en la Ilustración 29, donde podemos comprobar que el nivel de señal recibido en el municipio de Calar de la Santa es bueno.



Ilustración 29. Cobertura del eNodeB2 proporcionada por el sistema con Okumura – Hata con Xirio Online.

En la ilustración 30 se han sobrepuerto las coberturas de ambos eNodeBs pero para evitar confusiones a nivel visual entre los distintos sectores establecidos (6 en total), únicamente se han añadido aquellos que dan cobertura a nuestros municipios. Por tanto, se observa que los municipios de Cañada de la Cruz e Inazares son cubiertos por el eNodeB1 desplegado mientras que Calar de la Santa por el eNodeB2.

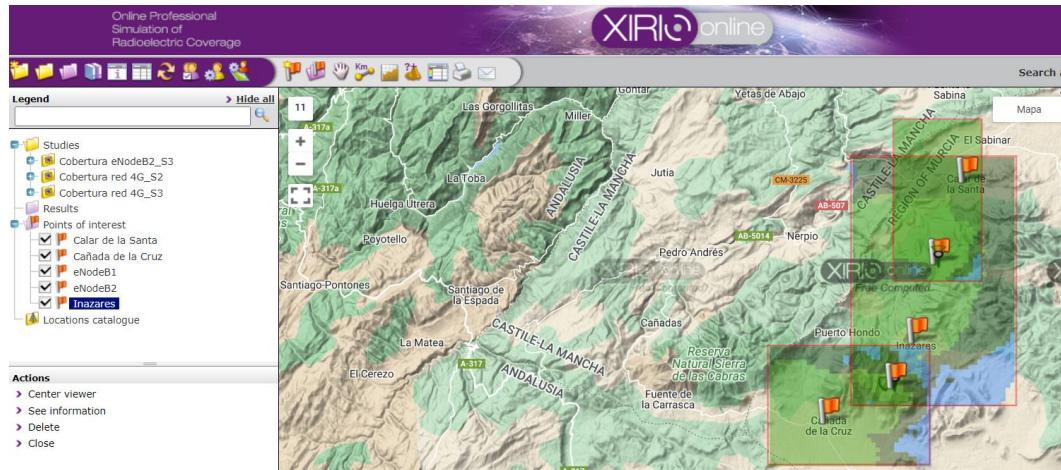


Ilustración 30. Cobertura total proporcionada por el sistema con 2 eNodeBs y Okumura – Hata.

Tras esta implementación, podemos confirmar que de esta forma, los 3 municipios reciben el nivel de señal esperado.

### 3.9. Backhaul inalámbrico

Para unir los eNodesB mostrados en la ilustración 31, cuyo radioenlace se ha resaltado en color rojo, se ha recurrido al uso del *backhaul* inalámbrico, ya que, no pueden conectarse directamente al emplazamiento de telecomunicaciones debido a la propia naturaleza del terreno que presenta elevaciones, bloqueando la señal e impidiendo tener radioenlaces directos.

Antes de continuar, cabe destacar que el eNodeB2 se ha propuesto para de alguna forma poder amplificar la señal hasta el municipio de Calar de la Santa, ya que, como se ha comentado durante las simulaciones realizadas, no es posible conectarlos directamente a la red troncal mediante radioenlaces.

El término *backhaul* inalámbrico (*Wireless backhaul*) hace referencia a la red de transporte que conecta el núcleo de la red y la RAN (*Radio Access Network*) de la red móvil. Además, recientemente la introducción de pequeñas células ha incrementado el concepto de *fronthaul* que es una red de transporte que conecta la macrocelda con celdas pequeñas. También, las innovaciones para reducir la demanda en *backhaul* móvil, a veces conlleva realizar cambios de la arquitectura en la antena que sería la unidad de radio en 4G y la unidad digital conocida como controlador.

*Backhaul* por microondas es la tecnología más utilizada debido a su facilidad de implementación que se puede desplegar en tan solo unos días. La mayoría de los MNOs (*Mobile Network Operators*) confía en soluciones de *backhaul* por microondas en las bandas situadas entre 7 GHz y 40 GHz, además de otras como la banda V y la banda E que soportan 60 GHz y 70/80 GHz respectivamente [31].

Las microondas pueden ser utilizadas en los modos LOS (*Line Of Sight*) y NLOS (*Non Line Of Sight*). Aunque, para este segundo modo, se complica su uso en las frecuencias mencionadas en el párrafo anterior, estas son ideales para ser usadas en una cadena, malla o topologías de anillo. Además, es posible combinar microondas de banda de baja frecuencia con microondas de banda de alta frecuencia para lograr una capacidad alta a largas distancias con mayor disponibilidad.

A pesar de que es preferible no diseñar *backhauls* con muchos “saltos”, es posible realizar uno o dos saltos sin problemas de retardo. Puesto que para nuestra red, en el peor de los casos tan solo se realizarán un salto, a priori se debería poder realizar sin problema.

Teniendo en cuenta las características de nuestra red, se ha optado por el *backhaul* inalámbrico por microondas para realizar los enlaces críticos comentados al inicio del presente apartado.

Para cubrir el RL (*RadioLink*) 2 se va a optar por el rango de frecuencias medio que es capaz de soportar saltos de entre 8 km y 20 km y que trabaja en el rango de frecuencias situado entre 11 y 23 GHz [32].

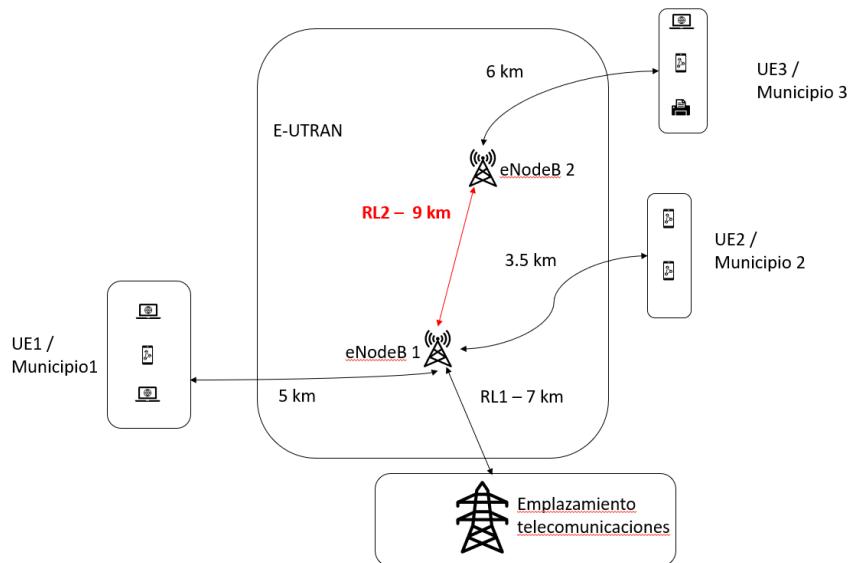


Ilustración 31. Esquema básico red 4G en pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia.

### 3.10. Descripción de la solución de red 4G propuesta

Uno de los principales objetivos de este trabajo era diseñar una red 4G que fuera capaz de ofrecer un mínimo servicio que cubriera las necesidades de los usuarios en las pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia. Llegados a este apartado, tras haber estudiado los requerimientos así como el dimensionado de la red, seremos capaces de proponer algunos de los elementos que formarán la red así como un posible diseño.

En la Ilustración 31, se ha introducido de forma básica la propuesta de diseño de nuestra red 4G, donde se pueden diferenciar los elementos más relevantes pero sin profundizar en los aspectos más importantes de una red de estas características.

Dependiendo del bloque al que hagan referencia, podemos dividir la red de la siguiente forma:

- **Red troncal / EPC:**

Todos los componentes de la red serán controlados en este extremo de la red.

Dentro de este extremo de la red, mencionar que las coordenadas de la ubicación del emplazamiento de telefonía móvil quedan recogidas en la Tabla 27.

Emplazamiento	Latitud	Longitud
VP POLIGONO 2 PARCELA 2, NA. CARAVACA DE LA CRUZ, MURCIA	37°59'38.2"N	002°15'22.9"W

Tabla 27. Coordenadas de la ubicación del emplazamiento de telefonía móvil.

- **Red de acceso / E-UTRAN:**

En la Ilustración 31 se ha representado la red 4G propuesta que se compone de un total de 2 eNodeBs, donde el primero de ellos está conectado directamente el emplazamiento de telecomunicaciones de la empresa proveedora del servicio. Además, tal y como hemos visto en el apartado 3.9, el radioenlace entre ambos eNodeBs es crítico y se han conectado entre sí directamente mediante el uso *backhaul* inalámbrico por microondas.

También, mencionar que el eNodeB1 dará cobertura a los municipios de Cañada de la Cruz e Inazares, mientras que el eNodeB2 hará lo propio con el municipio de Calar de la Santa.

En la siguiente tabla se recogen las coordenadas de la ubicación de ambos eNodeBs:

Coordenadas		
Estación base	Latitud	Longitud
eNodeB1	38°03'10"N	002°13'38"W
eNodeB2	38°07'41.96"N	002°12'09.28"W

Tabla 28. Localización de los eNodeBs.

Dentro de esta parte de la red, cabe mencionar que para su despliegue, se proponen los siguientes equipos por su compatibilidad con las características de nuestra red y disponibilidad en el mercado.

- ❖ Antena RRZZ-65B-R4 del fabricante RFS (*Radio Frequency Systems*) cuyas características más relevantes quedan referenciadas en su *datasheet* [33].
- ❖ La estación base RBS (*Radio Base Station*) 6601 del fabricante Ericsson que incluye las unidades RRU (*Remote Radio Unit*) y BBU (*Baseband Unit*) necesarias [34].

- **Equipo de usuario / UE:**

En este extremo de la red, son numerosos los dispositivos que se pueden proponer, ya que hay muchos terminales disponibles en el mercado, un simple teléfono móvil inteligente compatible con la tecnología 4G es suficiente.

Hoy en día, es raro un usuario que no tenga un dispositivo compatible con esta tecnología, y a modo de ejemplo, podemos decir que un iPhone 6s sería suficiente para conectarse a la red.

## 4. Simulación de la red 4G propuesta en *Xirio Online*

En este apartado, vamos a realizar una simulación introduciendo en *Xirio Online* las características de la red propuesta. En concreto, vamos a analizar la cobertura de las estaciones bases en diferentes localizaciones y ver las diferencias entre ellas.

Posteriormente, también vamos a analizar el enlace entre el salto de *backhaul* propuesto, donde estudiaremos el nivel de señal recibido. Las características técnicas de los equipos utilizados se recogen en el apartado de anexos.

### 4.1. Estudio de la cobertura

En este subapartado, vamos a proponer 3 escenarios distintos, donde, en cada uno de ellos se planteará una ubicación diferente para ambos eNodeBs, posteriormente se analizará la cobertura en el área propuesta y se estudiará que ubicación es la más óptima.

#### 4.1.1. Primera ubicación

En primer lugar, vamos a simular la cobertura del primer eNodeB, posteriormente haremos lo propio con el segundo eNodeB para finalmente simular ambos y ver su impacto en al área seleccionada.

Para ello, se proponen las siguientes coordenadas para la ubicación de ambos eNodeBs:

Estación base	Latitud	Longitud
eNodeB1	38°03'07.10"N	002°13'30.21"W
eNodeB2	38°07'41.96"N	002°12'09.28"W

Tabla 29. Localización de los eNodeBs.

En la ilustración 32, se ha simulado la cobertura del primer emplazamiento teniendo en cuenta las características de nuestra red 4G propuesta.

Podemos ver como los municipios de Cañada de la Cruz e Inazares quedan cubiertos por el eNodeB1. Por otro lado, el segundo eNodeB está también situado dentro de dicha área de cobertura, facilitando la conexión entre ambos eNodeBs mediante el uso de *backhaul* inalámbrico.

Además, se ha considerado que el eNodeB es de 2 sectores, ya que, es más que suficiente para llevar la señal a los puntos más relevantes de nuestra red, y carece de sentido añadir un tercer sector para este estudio.

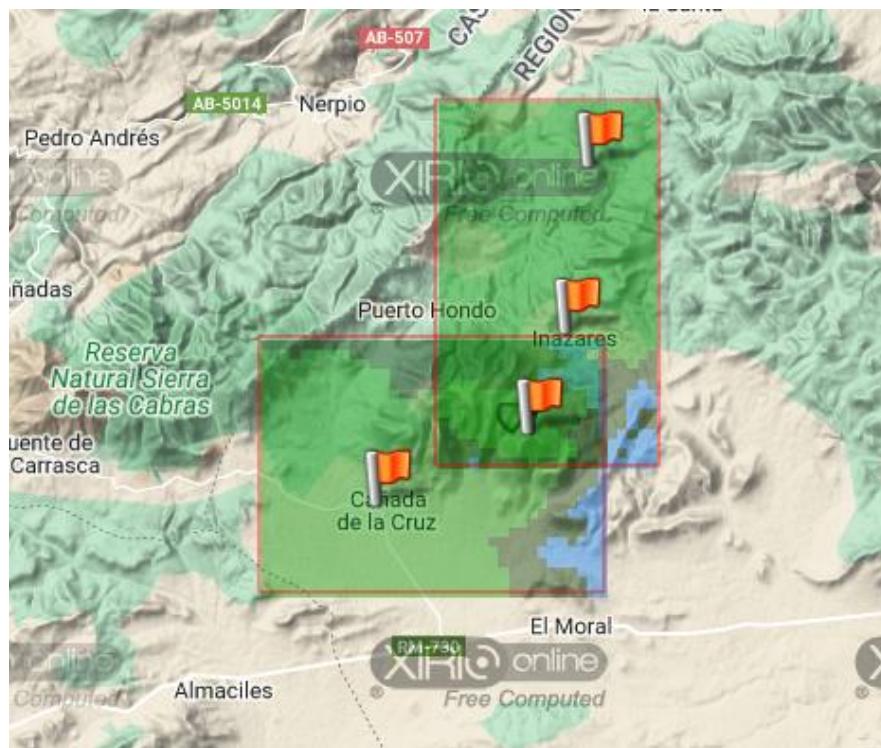


Ilustración 32. Simulación cobertura total mediante *Xirio Online* del eNodeB1 de la red propuesta.

De forma análoga, en la siguiente imagen podemos ver que el municipio de Calar de la Santa queda dentro del rango de cobertura del eNodeB2:

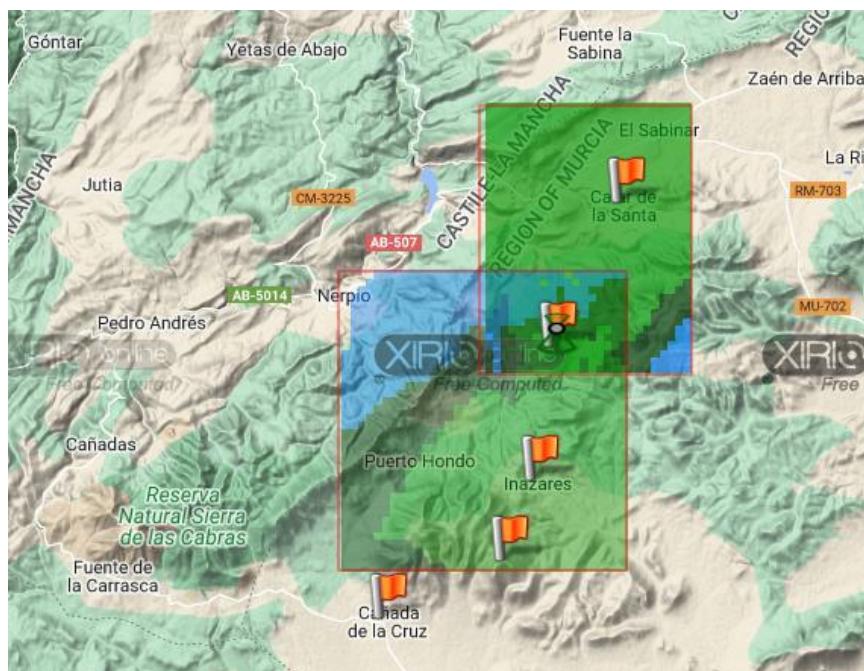


Ilustración 33. Simulación cobertura total del eNodeB2 de la red propuesta con Xirio Online.

Para este eNodeB, también se han considerado 2 sectores, puesto que nuevamente son suficientes para cumplir los objetivos de nuestra red.

Finalmente, en la siguiente ilustración, podemos ver como los requisitos en términos de cobertura de la red y ubicación de las estaciones base, se cumple.

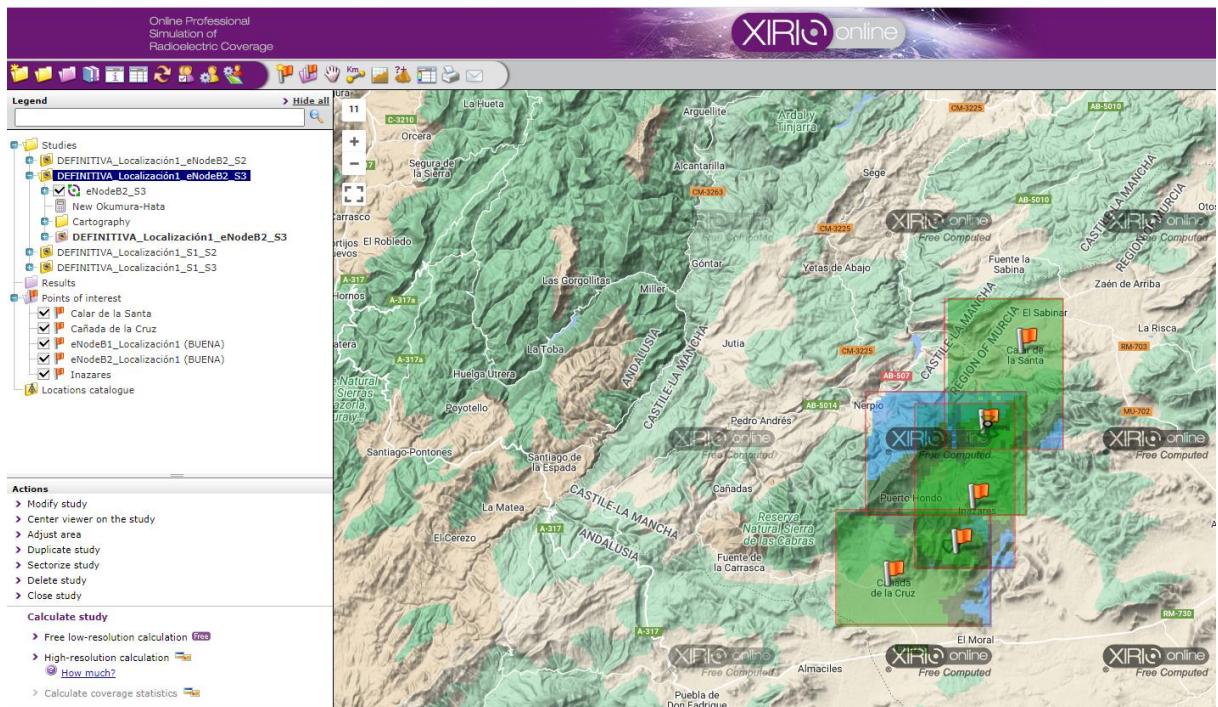


Ilustración 34. Simulación cobertura total de la red propuesta con Xirio Online para la primera ubicación de los eNodeBs.

En general, podemos confirmar que los 3 municipios a los que se deseaba dar cobertura quedan cubiertos mediante esta implementación.

#### 4.1.2. Segunda ubicación

En este subapartado, vamos a repetir los mismos pasos que en el anterior, con la diferencia de que los eNodeBs estarán ubicados de acuerdo a las siguientes coordenadas:

Estación base	Latitud	Longitud
eNodeB1	38°03'07.10"N	002°13'30.21"W
eNodeB2	38°10'36.74"N	002°10'26.64"W

Tabla 30. Localización de los eNodeBs.

Como podemos ver, la ubicación del eNodeB1 será la misma estudiada en el subapartado anterior, por tanto, no vamos a repetir de nuevo dicha simulación.

La siguiente ilustración, nos muestra la cobertura para la nueva ubicación del eNodeB2, que está situado en el municipio de Calar de la Santa y cuyos resultados no cumplen con los requisitos de cobertura esperados.

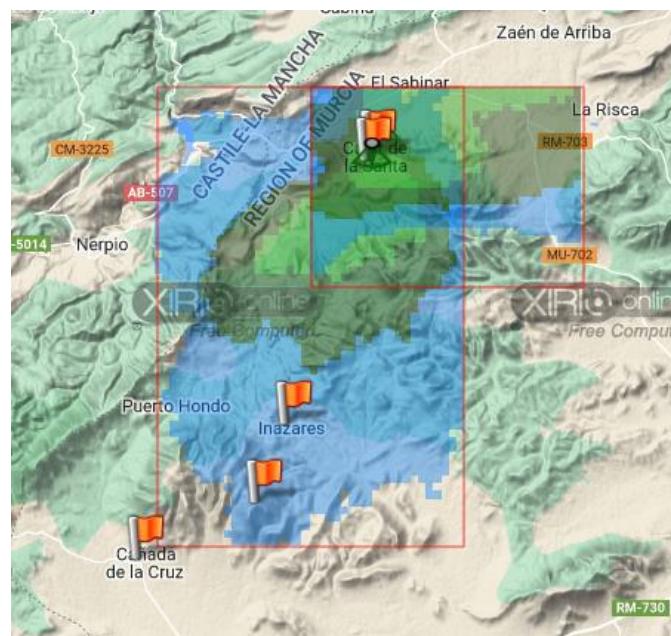


Ilustración 35. Simulación cobertura total del eNodeB2 de la red propuesta con *Xirio Online*.

Para este eNodeB, también se han considerado 2 sectores, puesto que serían suficientes para cumplir los objetivos de nuestra red, aunque en este caso no se cumplan.

Finalmente, en la siguiente ilustración, podemos ver como los requisitos en términos de cobertura de la red y ubicación de las estaciones base, no se cumplen.

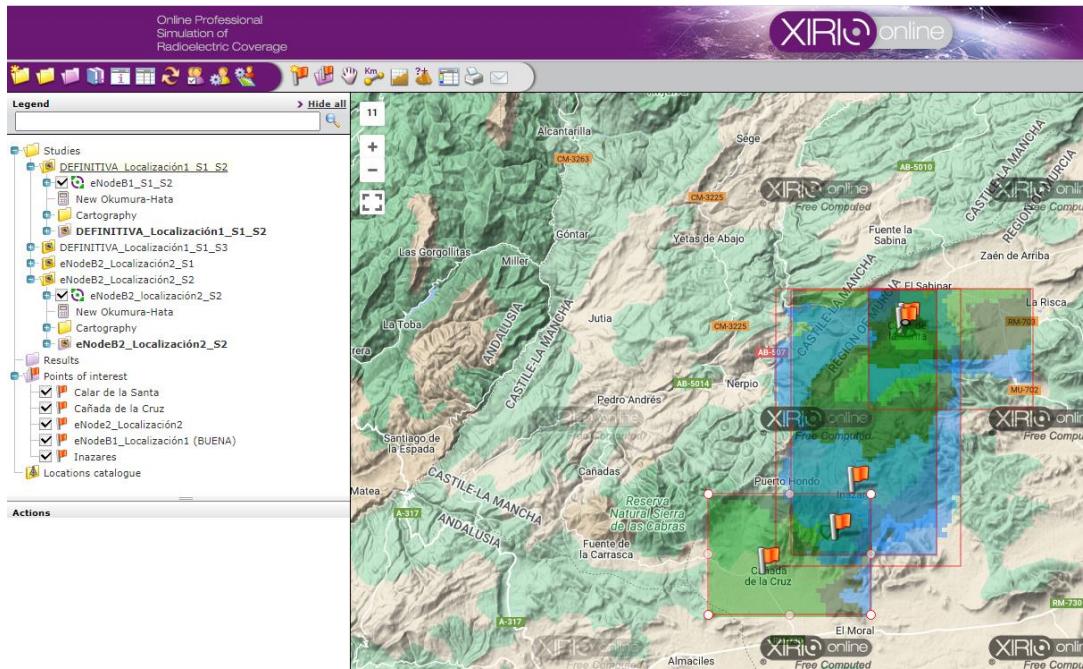


Ilustración 36. Simulación cobertura total de la red propuesta con *Xirio Online* para la segunda ubicación de los eNodeBs.

En general, podemos observar cómo los requisitos en términos de cobertura, tan solo se cumplen para el eNodeB1 y no así para el eNodeB2.

Esto se debe a que las elevaciones naturales del terreno impiden la propagación de la señal de acuerdo al perfil orográfico entre ambos eNodeBs, mostrado en la siguiente ilustración:

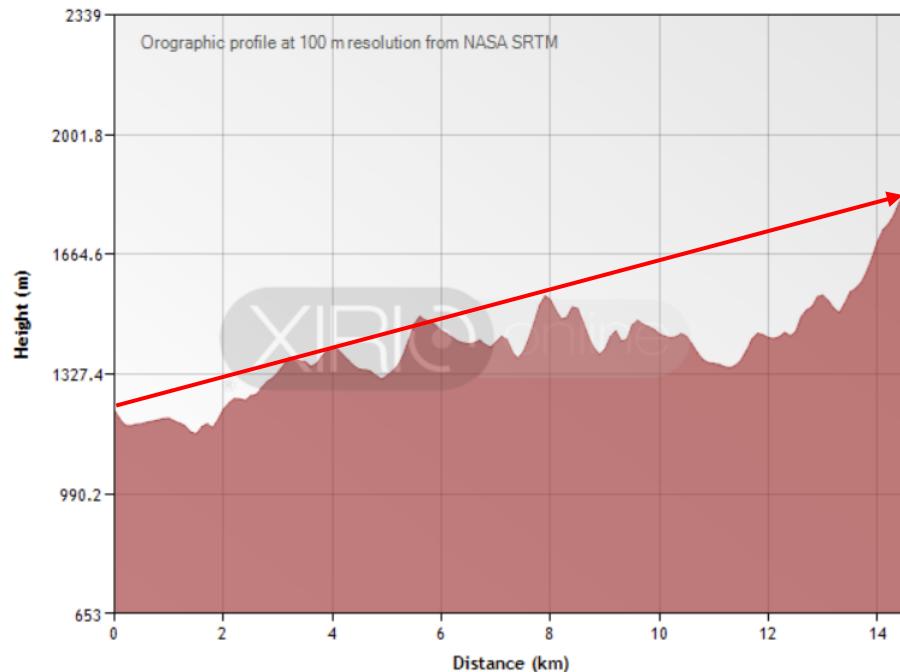


Ilustración 37. Perfil orográfico entre ambos eNodeBs para la segunda ubicación con *Xirio Online*.

Por tanto, la ubicación presentada en este caso para el eNodeB2, no es válida.

#### 4.1.3. Tercera ubicación

Por último, en este subapartado, planteamos una tercera ubicación para ambos eNodeBs, cuyas coordenadas quedan recogidas en la siguiente tabla:

Estación base	Latitud	Longitud
eNodeB1	38°04'04.96"N	002°15'45.61"W
eNodeB2	38°08'14.00"N	002°12'30.00"W

Tabla 31. Localización de los eNodeBs.

En la ilustración 37, se ha simulado la cobertura del primer emplazamiento teniendo en cuenta las características de nuestra red 4G propuesta.

Podemos ver como los municipios de Cañada de la Cruz e Inazares quedan cubiertos por el eNodeB1, sin embargo, su alcance al eNodeB2 no es tan bueno, ya que la señal llega algo debilitada y esto no nos interesa.

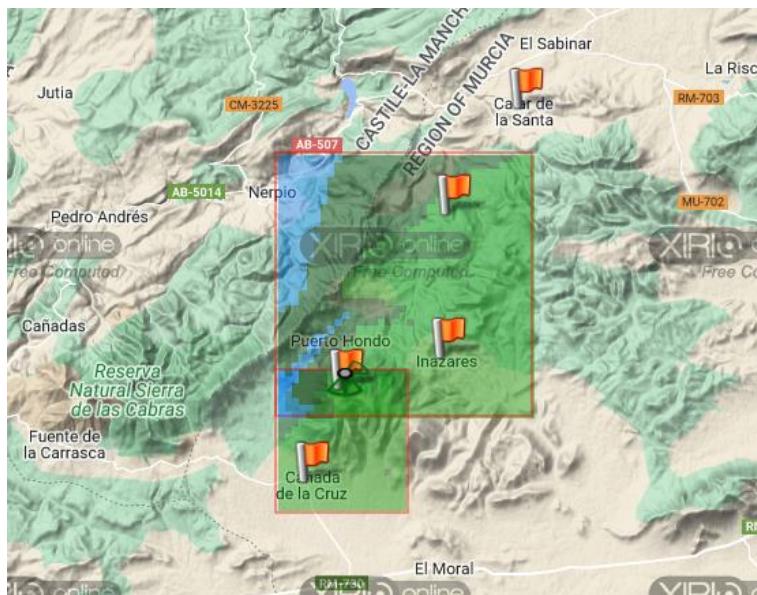


Ilustración 38. Simulación cobertura total mediante Xirio Online del eNodeB1 de la red propuesta.

Cabe mencionar que se ha considerado nuevamente que el eNodeB es de 2 sectores, ya que, es más que suficiente para llevar la señal a los puntos más relevantes de nuestra red.

De forma análoga, en la siguiente imagen podemos ver que el municipio de Calar de la Santa queda dentro del rango de cobertura del eNodeB2:

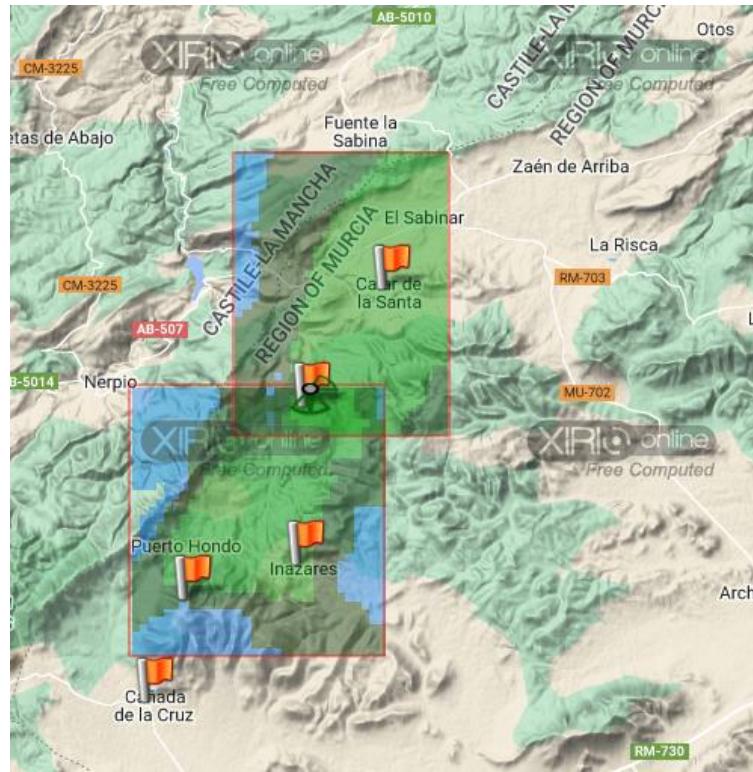


Ilustración 39. Simulación cobertura total del eNodeB2 de la red propuesta con *Xirio Online*.

Para este eNodeB, también se han considerado 2 sectores, puesto que nuevamente son suficientes para cumplir los objetivos de nuestra red.

Finalmente, en la siguiente ilustración, podemos ver como los requisitos en términos de cobertura de la red y ubicación de las estaciones base, se cumple.

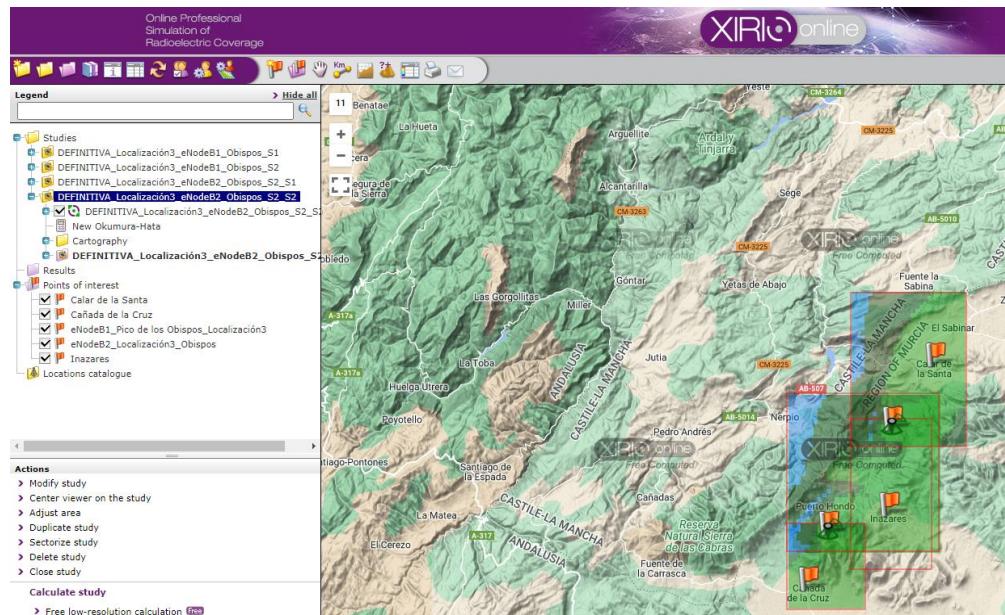


Ilustración 40. Simulación cobertura total de la red propuesta con *Xirio Online* para la tercera ubicación de los eNodeBs.

En general, podríamos considerar esta ubicación válida, ya que la cobertura en los municipios se podría aceptar para cumplir los requisitos esperados. Sin embargo, en este caso, el principal problema recae en el enlace *backhaul*, ya que, la propia naturaleza del terreno impide una conexión directa y la señal llega debilitada, por tanto, no nos interesa.

Nuevamente, el perfil orográfico entre ambos puntos parece ser el principal problema:

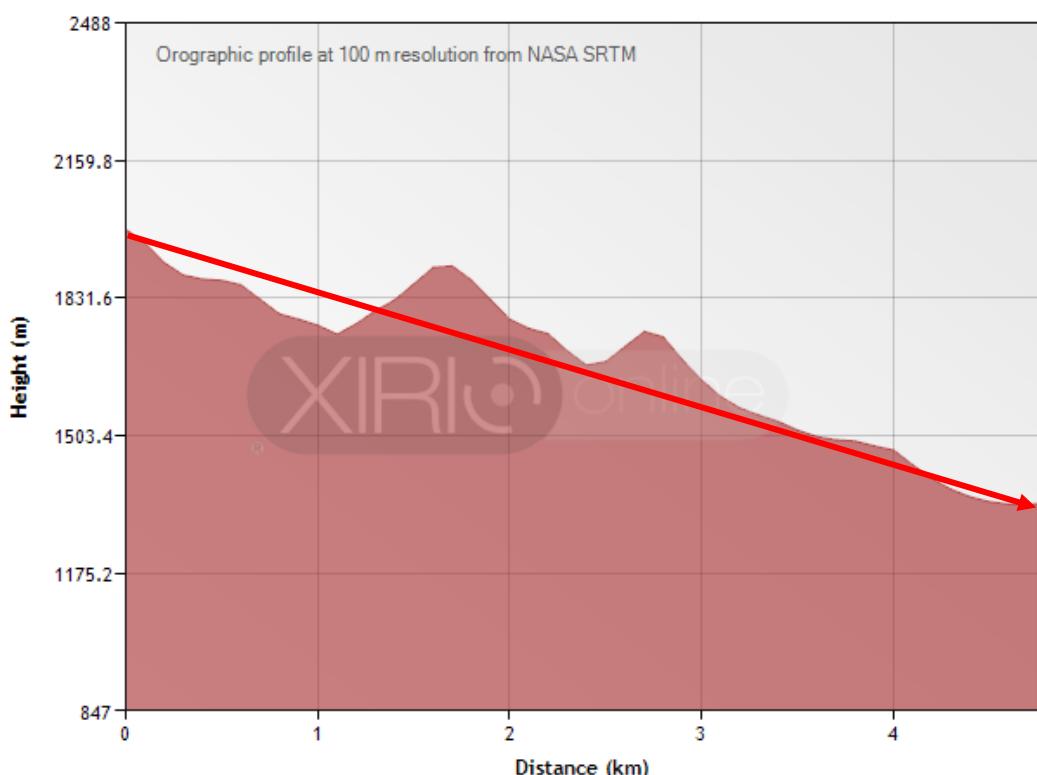


Ilustración 41. Perfil orográfico entre los eNodeBs propuestos en este escenario.

Tras estudiar las 3 simulaciones de cobertura, queda claro que la primera ubicación estudiada es la más adecuada en términos de cobertura, ya que, para las otras 2, la naturaleza del terreno no permite transmitir la señal de forma adecuada para entregar la cobertura esperada en cada uno de los municipios de nuestra red.

## 4.2. Estudio de los enlaces

En este apartado, se ha analizado el enlace *backhaul* entre ambos eNodeBs.

Si volvemos a echar un vistazo a la Ilustración 31, tenemos que para el enlace RL2, es decir, nuestro enlace *backhaul*, simplemente tendríamos que transportar el tráfico del eNodeB2. Esto cambia para el enlace RL1 porque tendremos que transportar el tráfico del eNodeB1 + eNodeB2.

Atendiendo al código de colores de *Xirio Online*, el color verde indica que los enlaces son óptimos y en recepción se tiene un nivel de señal adecuado para cumplir con los requisitos de la red. Esto, concuerda con la cobertura analizada previamente en cada uno de los municipios.

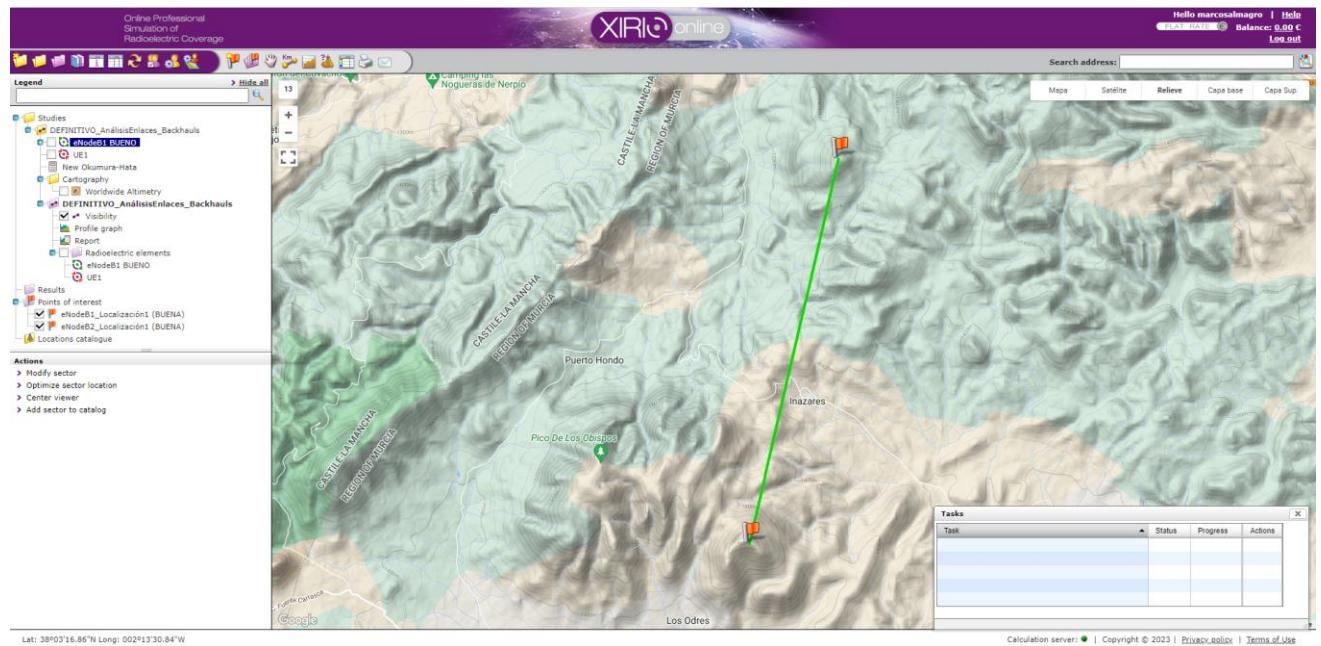


Ilustración 42. Simulación del enlace *backhaul* de la red propuesta con *Xirio Online*.

En la siguiente ilustración, podemos observar el nivel de señal recibido para el trayecto de propagación conectando ambos elementos. Dicho nivel adquirido queda representado en un color diferente según el espacio libre de la primera zona de Fresnel.

Además, también se obtiene el perfil orográfico entre ambos *eNodeBs*.

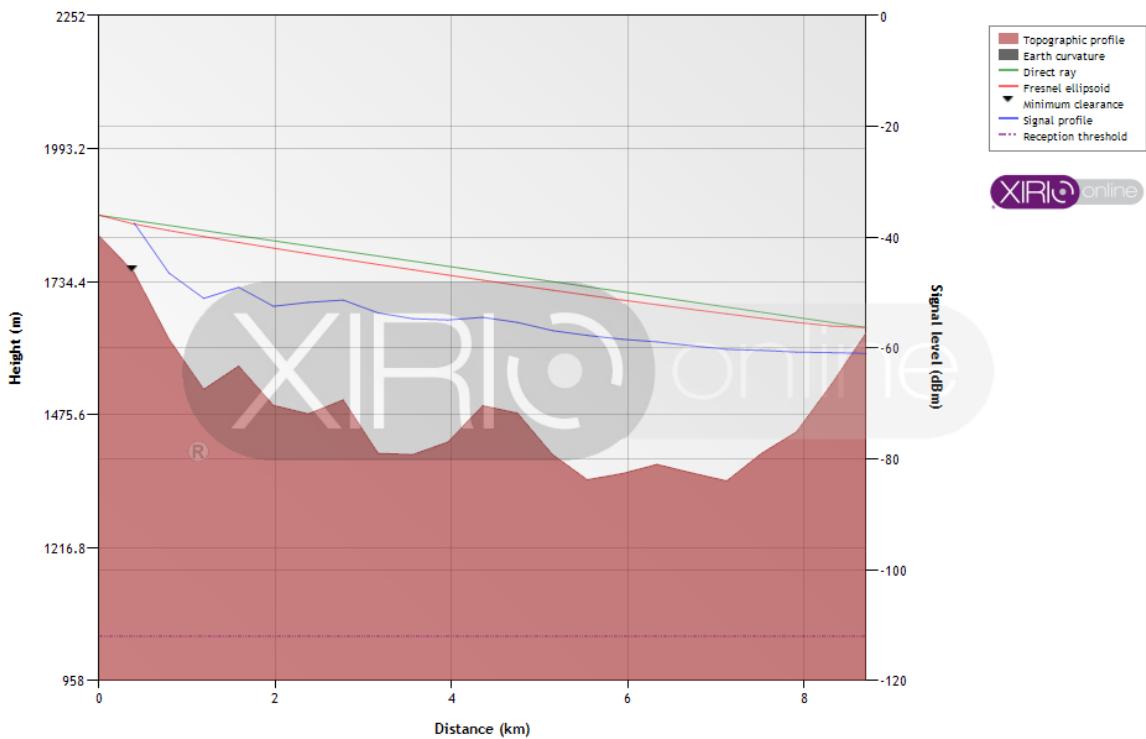


Ilustración 43. Perfil orográfico entre ambas estaciones con el perfil de la señal con *Xirio Online*.

En la Ilustración 44 se ha obtenido el reporte correspondiente del enlace *backhaul* analizado. En este, se obtiene la distancia, la altura y el nivel de señal recibido en dBm, confirmando que es el esperado, corroborando así de nuevo, los resultados obtenidos en la cobertura de cada emplazamiento.

Link report		
Distance	Height (m)	Signal level (dBm)
0	1823.56	---
0.396	1752.04	-37.42
0.791	1622.24	-46.45
1.187	1524.34	-51.03
1.582	1569.62	-49.03
1.978	1492.71	-52.45
2.373	1476.2	-51.74
2.769	1503.46	-51.33
3.164	1399.11	-53.66
3.56	1396.75	-54.7
3.955	1421.19	-54.92
4.351	1491.88	-54.45
4.746	1477.38	-55.37
5.142	1397.03	-56.85
5.537	1347.8	-57.71
5.933	1359.94	-58.4
6.328	1377.73	-58.89
6.724	1361.28	-59.58
7.119	1345.99	-60.22
7.515	1399.77	-60.42
7.91	1441.68	-60.73
8.306	1534.2	-60.83
8.701	1635.06	-60.96

Ilustración 44. Nivel de señal recibida del enlace *backhaul*.

En general, podemos confirmar que para el enlace backhaul se obtienen los resultados esperados tras las simulaciones, puesto que existe una conexión directa entre ambos elementos y el nivel de señal recibido es el esperado.

## 5. Presupuesto

Para el despliegue de nuestra red 4G se han presupuestado varias partidas de elementos que conforman este tipo de redes.

El coste de la red para la zona de estudio es orientativo, ya que, en algunos casos no se ha podido conseguir el precio del artículo propuesto por las limitaciones que presenta el vendedor en sus plataformas en línea, por lo que se ha optado por añadir en el presupuesto el precio de otro artículo similar. Todos los detalles referentes a los precios de cada artículo se han añadido en el apartado de anexos.

La suma total es elevada teniendo en cuenta la escasa población de la zona así como las condiciones de la misma.

En la tabla 17 se han recogido todos los detalles de los gastos estimados. Además, en el caso de los gastos directos de personal se ha fijado un tipo fijo de un 20% que es el límite de lo presupuestado en infraestructuras, obra civil, equipamiento y otros materiales [35].

Del mismo modo, se ha optado por un tipo fijo del 15% que es el límite en costes indirectos, que no son otros que los posibles gastos derivados de los costes directos [35].

DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIDAD (€)	Previsión del número de unidades	PRECIO TOTAL (€)
Torre de comunicación móvil	938,40	2	1.876,80
Instalación torre	124.449,75	2	248.899,50
Antena RRZZ-65B-R4	281,34	8	2.250,72
Soporte de montaje de antena	415,47	8	3.323,76
Estación base eNodeB (BBU y RRU)	507,02	2	1.014,04
Armario exterior de telecomunicaciones	1.764,16	2	3.528,32
Refugio de la torre de telecomunicaciones	4.771,58	2	9.543,16
Sistema protección contra rayos	5.000,00	2	10.000,00
<b>TOTAL PRESUPUESTO BASE</b>			<b>280.436,30</b>

Total costes directos (personal, infraestructura, obra civil, equipamiento, otros materiales)	20%		56.087,26
Total costes indirectos	15%		8.413,09
<b>TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN</b>			<b>344.936,65 €</b>

Tabla 32. Presupuesto de ejecución.

## 6. Conclusiones y líneas futuras

Tras el desarrollo del trabajo se llega a la conclusión de que el despliegue de redes de telecomunicaciones inalámbricas en entornos rurales es una alternativa más rápida de implementar y menos costosa en comparación de las redes cableadas que se suelen desplegar en zonas urbanas.

Desde la liberación de la banda de 800 MHz, la tecnología 4G ha jugado un papel fundamental en estas áreas, ofreciendo una conexión a Internet con menor latencia o mayor velocidad entre otros aspectos, a personas que no tenían acceso a ciertos recursos principalmente debido a su aislamiento geográfico y la baja rentabilidad que presentaba el despliegue de tecnologías cableadas.

Hemos podido realizar adecuadamente la planificación de la red 4G en la zona propuesta de la Región de Murcia para satisfacer los requisitos estudiados durante el proyecto.

El objetivo principal establecido inicialmente era brindar de conexión 4G a cada uno de los municipios comentados durante el desarrollo del trabajo para que la población de la zona pudiera tener acceso a ciertos recursos facilitados por esta tecnología. Esto ha sido posible con el despliegue de 2 eNodeBs situados en los puntos más altos entre nuestros núcleos urbanos, ya que, se ha conseguido satisfacer las necesidades de los usuarios concentrados en los 3 municipios de forma teórica así como mediante la simulación en *Xirio Online* en términos de cobertura. El hecho de que el área de cada uno de estos núcleos urbanos sea muy reducida así como una escasa población han favorecido que se cumplan los requisitos planteados iniciales.

En términos económicos, atendiendo al presupuesto de ejecución, el precio es elevado teniendo en cuenta que algo menos de 300 usuarios demandan este tipo de servicios en este área rural. Por lo que, no se garantiza su rentabilidad ni a corto ni a largo plazo, en función de una serie de factores que podrían ir variando.

Los resultados obtenidos han sido los esperados. Por un lado, conocíamos que la población en dicha zona es escasa e intuíamos que el despliegue de un único eNodeB bastaría en términos de capacidad. Sin embargo, debido a la propia naturaleza del entorno, también se esperaba que el despliegue de un único emplazamiento no fuera suficiente para dar cobertura a los 3 municipios en términos de cobertura.

En el presente proyecto se ha llevado a cabo el diseño y la simulación de una red 4G para las pedanías altas del noroeste de la Región de Murcia. Para el desarrollo del proyecto se ha seguido el plan y la metodología propuestas en la PEC1, sin embargo, el plan establecido en la tercera y cuarta PEC no se ha cumplido debido a unos contratiempos derivados del análisis teórico del

dimensionado de la red y de la simulación de la red mediante un *software* adecuado.

En esta línea, han sido necesarios una serie de cambios que se describen brevemente a continuación:

- **Replanteo de las ubicaciones y del número de eNodeBs:** se ha revisado la geografía del área rural así como de los núcleos urbanos mediante *Google Maps*, *Google Earth* y *Xirio Online*, identificando los lugares propicios para la ubicación de los eNodeBs, así como el número de estaciones base a instalar en dicha área que inicialmente era de 1 pero tras las simulaciones, se ha llegado a la conclusión de que eran necesarias 2 estaciones bases.
- **Simulación de la red:** el plan inicial era simular la red con apoyo del *software Radio Mobile*, sin embargo, puesto que el modelo de propagación utilizado por este programa es el de *Longley – Rice* cuya complejidad de cálculo no se ha considerado adecuada para un proyecto de este tipo, se ha optado por la utilización de la herramienta *Xirio Online* que permite el cálculo de pérdidas mediante *Okumura – Hata*, que a pesar de que sus cálculos proporcionan buenos resultados en entornos urbanos, no lo son en áreas rurales.
- **Realización del proyecto técnico:** esta es la parte que se ha recogido en el presente documento y que expone una serie de apartados donde se han ido trabajando todos los aspectos propuestos inicialmente. Esta memoria técnica ha sufrido modificaciones en función de los cambios mencionados así como en base a los comentarios del tutor tras la corrección de cada una de las PECs.

Por tanto, después de todo el proceso llevado a cabo en la elaboración de este proyecto, es de interés seguir investigando aquellos aspectos que no han sido tratados en la memoria como profundizar en el funcionamiento de una red LTE-A, elaborar más la parte de la red del usuario final e interconectar los distintos dispositivos con la red troncal mediante el eNodeB correspondiente así como profundizar en la rentabilidad del despliegue de la red.

Además, también se trabaja en la siguiente generación denominada 5G, que ya está disponible en muchas ciudades de España pero no en zonas rurales, donde parece que para el año 2024 podríamos empezar a tener algún despliegue de esta tecnología según [36]. El punto central de esta quinta generación es el Internet de las Cosas, en el que no solo existe comunicación entre personas sino también entre máquinas.

## 7. Glosario

Término	Definición
<b>3GPP</b>	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
<b>ADSL</b>	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
<b>AIPN</b>	<i>All-IP Network</i>
<b>AMC</b>	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
<b>AMPS</b>	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
<b>BBU</b>	<i>Baseband Unit</i>
<b>CQI</b>	<i>Continuous Quality Improvement</i>
<b>CREM</b>	Centro Regional de Estadística de Murcia
<b>CSI</b>	<i>Channel State Information</i>
<b>EDGE</b>	<i>Enhanced Data GSM Evolution</i>
<b>eNodeB</b>	<i>Evolved Node B</i>
<b>EPC</b>	<i>Evolved Packet Core</i>
<b>EPS</b>	<i>Evolved Packet System</i>
<b>E-UTRA</b>	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i>
<b>FDD</b>	<i>Frequency-Division Duplexing</i>
<b>FDMA</b>	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
<b>FM</b>	<i>Frequency modulation</i>
<b>GGSN</b>	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Service</i>
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile Communication</i>
<b>HSPA</b>	<i>High Speed Packet Access</i>
<b>IDFT / DFT</b>	<i>Inverse Discrete Fourier Transform / Discrete Fourier Transform</i>
<b>IFFT / FFT</b>	<i>Inverse Fast Fourier Transform / Fast Fourier Transform</i>
<b>INE</b>	Instituto Nacional de Estadística
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i>
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunication Union</i>
<b>LOS</b>	<i>Line Of Sight</i>
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i>
<b>LTE - A</b>	<i>Long Term Evolution – Advanced</i>
<b>MCS</b>	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
<b>ME</b>	<i>Mobile Equipment</i>
<b>MIMO</b>	<i>Multiple Input Multiple output</i>
<b>MIMO</b>	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
<b>MME</b>	<i>Mobility Management Entity</i>
<b>MT</b>	<i>Mobile Terminal</i>
<b>NLOS</b>	<i>Non Line Of Sight</i>
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
<b>PAPR</b>	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
<b>PBCH</b>	<i>Physical Broadcast Channel</i>
<b>PCFICH</b>	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>
<b>PCRF</b>	<i>Policy and Charging Rules Function</i>

<b>PDCCH</b>	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
<b>PDN</b>	<i>Packet Data Network</i>
<b>PGW</b>	<i>Packet Data Network Gateway</i>
<b>PHICH</b>	<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i>
<b>PIRE</b>	<i>Potencia Isótropa Radiada Equivalente</i>
<b>PMI</b>	<i>Precoding Matrix indicator</i>
<b>PUCCH</b>	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i>
<b>RAB</b>	<i>Radio Access Bearer</i>
<b>RAN</b>	<i>Radio Access Network</i>
<b>RB</b>	<i>Radio Bearer</i>
<b>RB</b>	<i>Resource Block</i>
<b>RBS</b>	<i>Radio Base Station</i>
<b>RF</b>	<i>Radio Frequency</i>
<b>RFS</b>	<i>Radio Frequency Systems</i>
<b>RI</b>	<i>Range Indicator</i>
<b>RNC</b>	<i>Radio Network Controller</i>
<b>RRU</b>	<i>Remote Radio Unit</i>
<b>RS</b>	<i>Reference Signal</i>
<b>RSRP</b>	<i>Reference Signal Received Power</i>
<b>RU</b>	<i>Resource Unit</i>
<b>Rx</b>	<i>Receptor</i>
<b>SaaS</b>	<i>Software as a Service</i>
<b>SC-FD</b>	<i>Single Carrier Frequency Domain</i>
<b>SC-FDMA</b>	<i>Single Carrier – Frequency Division Multiple Access</i>
<b>SGW</b>	<i>Serving Gateway</i>
<b>SINR</b>	<i>Signal-to-Interference-plus- noise ratio</i>
<b>TCP/IP</b>	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
<b>TDD</b>	<i>Time Division Duplexing</i>
<b>TDMA</b>	<i>Time-Division Multiple Access</i>
<b>TE</b>	<i>Terminal Equipment</i>
<b>Tx</b>	<i>Transmisor</i>
<b>UE</b>	<i>User Equipment</i>
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunication Systems</i>
<b>WCDMA</b>	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

## 8. Bibliografía

- [1] Del Castillo, Carlos (10 de noviembre de 2021). Un 21% de la España rural sobrevive sin conexión a Internet. Disponible en:  
[https://www.eldiario.es/tecnologia/21-espana-rural-sobrevive-conexion-internet\\_1\\_8475949.html](https://www.eldiario.es/tecnologia/21-espana-rural-sobrevive-conexion-internet_1_8475949.html) [Consulta 8 de octubre de 2022]
- [2] Avancedigital.mineco.gob.es (Julio 2022). COBERTURA DE BANDA ANCHA EN ESPAÑA EN EL AÑO 2021. Disponible en:  
<https://avancedigital.mineco.gob.es/banda-ancha/cobertura/Documents/InformeCoberturaBandaAncha2021.pdf> [Consulta 8 de octubre de 2022]
- [3] Rajiv (1 de Agosto de 2022). Evolution of Wireless technologies 1G to 5G in mobile communication. Disponible en:  
<https://www.rfpage.com/evolution-of-wireless-technologies-1g-to-5g-in-mobile-communication/> [Consulta 20 de octubre de 2022]
- [4] Rantcell.com. What are the differences between 2G, 3G, 4G LTE y 5G networks? Disponible en: <https://rantcell.com/comparison-of-2g-3g-4g-5g.html> [Consulta 20 de octubre de 2022]
- [5] Torres, Jorge (18 de mayo de 2022). La tecnología del futuro ya está aquí. Conoce el 4G+. Disponible en: <https://roams.es/companias-telefonicas/blog/telefonia/cobertura-4g/> [Consulta 22 de octubre de 2022]
- [6] Pita, Cristina (5 de junio de 2021). MAPA | La lenta expansión de la velocidad de internet en la España vaciada. Disponible en:  
<https://www.newtral.es/mapa-velocidad-internet-espana-vaciada/20210605/> [Consulta 22 de octubre de 2022]
- [7] 3gpp (Marzo 2013). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Technical Specifications and Technical Reports relating to an Evolved Packet System (EPS) based 3GPP system (Release 10). Disponible en:  
<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=550> [Consulta 23 de octubre de 2022]
- [8] Chandler, Nathan. How 4G Works. Disponible en:  
<https://electronics.howstuffworks.com/4g.htm#pt8> [Consulta 23 de octubre de 2022]
- [9] 3.nd.edu. 4G Wireless Standard. Disponible en:  
<https://www3.nd.edu/~mhaenggi/NET/wireless/4G/> [Consulta 23 de octubre de 2022]

- [10] Sharetechnote.com. 4G/LTE – Latency. Disponible en: [https://www.sharetechnote.com/html/Handbook\\_LTE\\_Latency.html](https://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_Latency.html) [Consulta 23 de octubre de 2022]
- [11] Nicholls, Ivor (21 de enero de 2022). 4G vs LTE: Understanding the Difference Between 4G and LTE. Disponible en: <https://www.uctel.co.uk/blog/4g-vs-lte-understanding-the-difference-between-4g-and-lte> [Consulta 24 de octubre de 2022]
- [12] Sánchez Mínguez, Rubén (2 de septiembre de 2016). Arquitectura 4G. Disponible en: <http://rubensm.com/arquitectura-4g/> [Consulta 24 de octubre de 2022]
- [13] Ghayas, Adnan (20 de marzo de 2020). What Modulation Technique Is Used In 4G LTE Networks?. Disponible en: <https://commsbrief.com/what-modulation-technique-is-used-in-4g-lte-networks/> [Consulta 25 de octubre de 2022]
- [14] Ghayas, Adnan (5 de febrero de 2021). *Difference Between OFDM, OFDMA And SC-FDMA in 4G LTE*. Disponible en: <https://commsbrief.com/difference-between-ofdm-ofdma-and-sc-fdma-in-4g-lte/#:~:text=OFDM%20or%20Orthogonal%20Frequency%20Division,both%20time%20and%20frequency%20domains> [Consulta 26 de octubre de 2022]
- [15] IXIA (Noviembre 2009). SC-FDMA Single Carrier FDMA in LTE. Disponible en: <https://support.ixiacom.com/sites/default/files/resources/whitepaper/sc-fdma-indd.pdf> [Consulta 28 de octubre de 2022]
- [16] Ipv6go.net (2014). TUTORIAL LTE. Multiple Input Multiple Output – MIMO. Disponible en: <http://www.ipv6go.net/lte/mimo.php> [Consulta 29 de octubre de 2022]
- [17] CNMC Data (2021). Estaciones base LTE. Disponible en: <https://data.cnmc.es/telecomunicaciones-y-sector-audiovisual/conjuntos-de-datos/datos-provinciales/telecomunicaciones> [Consulta 2 de noviembre de 2022]
- [18] Velarde Sagastegui, Juan (Abril 2010). Calidad de Servicio en Internet. Disponible en: [http://www.oas.org/es/citel/infocitel/2010/abril/calidad\\_e.asp](http://www.oas.org/es/citel/infocitel/2010/abril/calidad_e.asp) [Consulta 4 de noviembre de 2022]
- [19] El-QADI, Ahmed (27 de mayo de 2021). Quality of Service (QoS) in LTE and NR. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/quality-service-qos-lte-nr-hassan-qadi> [Consulta 4 de noviembre de 2022]

- [20] Bectechnologies. Quality of Service (QoS) in LTE. Disponible en: <https://bectechnologies.net/wp-content/uploads/2019/12/QoS.pdf> [Consulta 5 de noviembre de 2022]
- [21] Commons.wikimedia.org (1 de junio de 2021). File: Atenuación mediana relativa al espacio libre ( $Amu(f,d)$ ), sobre un terreno casi asfaltado.svg. Disponible en: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atenuaci%C3%B3n\\_mediana\\_relativa\\_al\\_espacio\\_libre\\_%28\\_Amu%28f,d%29%29,\\_sobre\\_un\\_terreno\\_casi\\_asfaltado.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atenuaci%C3%B3n_mediana_relativa_al_espacio_libre_%28_Amu%28f,d%29%29,_sobre_un_terreno_casi_asfaltado.svg) [Consulta 6 de noviembre de 2022]
- [22] Xirio-online.com. OKUMURA – HATA. Disponible en: <https://www.xirio-online.com/web/help/es/okumura-hata.htm> [Consulta 8 de noviembre de 2022]
- [23] Mártil, Ignacio (2013). ¿Cómo funcionan las redes inalámbricas de telefonía móvil?. Disponible en: <http://iesostippo.es/electricidad/index.php/2-principal/233-como-funcionan-las-redes-inalambricas-de-telefonia-movil> [Consulta 10 de noviembre de 2022].
- [24] Valero, Claudio (21 de octubre de 2022). Así se reparten las frecuencias 2G, 3G, 4G y 5G en España. Disponible en: <https://www.adslzone.net/operadores/en-detalle/frecuencias-moviles-espana/> [Consulta 20 de noviembre de 2022]
- [25] Español.centurylink.com. ¿Qué velocidad de Internet necesito? Disponible en: <https://espanol.centurylink.com/home/help/internet/what-internet-speed-do-i-need.html> [Consulta 25 de noviembre de 2022]
- [26] Holma, Harri y Toskala, Antti (2009). LTE for UMTS - OFDM and SC-FDMA Based Radio Access. John Wiley & Sons
- [27] Rohde & Schwarz (2011). Sistema de prueba R&S®TS8980 verifica los indicadores de calidad LTE CQI, PMI y RI. Disponible en: [https://cdn.rohde-schwarz.com/magazine/pdfs\\_1/article/203/NEWS\\_203\\_spanish\\_TS8980.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/magazine/pdfs_1/article/203/NEWS_203_spanish_TS8980.pdf) [Consulta 2 de enero de 2023]
- [28] ETSI (2009). ETSI 3GPP Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical layer procedures, version 8.8.0 Release 8. Disponible en: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136213/08.08.00\\_60/ts\\_136213v080800p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/08.08.00_60/ts_136213v080800p.pdf) [Consulta 2 de enero de 2023]
- [29] INE (2020). Acceso a Internet de las viviendas principales por Comunidades Autónomas y forma de conexión. Disponible en: <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?txp=39488> [Consulta 2 de enero de 2023]

- [30] Enocat.carm.es (8 de febrero de 2022). Población según entidades y nacionalidad (por continentes). Disponible en: [https://econet.carm.es/inicio/-/crem/sicrem/PU\\_MoratallaCifras/P8016/sec8.html](https://econet.carm.es/inicio/-/crem/sicrem/PU_MoratallaCifras/P8016/sec8.html) [Consulta 26 de noviembre de 2022]
- [31] Gsma.com (19 de junio de 2019). *Mobile Backhaul: An Overview*. Disponible en: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/mobile-backhaul-an-overview/> [Consulta 30 de noviembre]
- [32] Gsma.com (Febrero 2021). *Spectrum for Wireless Backhaul*. Disponible en: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2021/02/wireless-backhaul-spectrum-positions.pdf> [Consulta 30 de noviembre de 2022]
- [33] RFS (18 de julio de 2022). APXVAALL12\_43-U-NA20 8-Ports, X-Pol, Panel Antenna, 1.2m, 2x 617-960/2x 1695-2690 MHz 65deg, Integrated RET. Disponible en: [https://www.rfsworld.com/pim/product/html/APXVAALL12\\_43-U-NA20](https://www.rfsworld.com/pim/product/html/APXVAALL12_43-U-NA20) [Consulta 2 de diciembre de 2022]
- [34] Fccid.io (2011). Product description for RBS 6601. Disponible en: <https://fccid.io/ANATEL/03726-11-01882/Manual/91C58E8E-07BF-467B-9D89-EDA81197FA49/PDF> [Consulta 2 de diciembre de 2022]
- [35] BOE (6 de junio de 2022). Orden ETD/507/2022. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2022-9277> [Consulta 2 de enero de 2022]
- [36] Fernández, Samuel (6 de junio de 2022). El gobierno subvencionará la instalación de torres rurales 5G con el nuevo plan UNICO 5G. Disponible en: <https://www.xatakamovil.com/conectividad/gobierno-subvencionara-instalacion-torres-rurales-5g-nuevo-plan-unico-5g#:~:text=El%20plan%20UNICO%205G%20se,concluidas%20para%20el%20a%C3%B3n%202024>. [Consulta 3 de enero de 2022]

## 9. Anexos



PRODUCT DATASHEET

**APXVAALL12\_43-U-NA20**

8-Ports, X-Pol, Panel Antenna, 1.2m, 2x 617-960/2x 1695-2690 MHz 65deg, Integrated RET

### FEATURES / BENEFITS

- MIMO 4x4 in low-band and mid-band
- Integrated and fieldreplaceable RET
- ACU model number: x2 ACU-A20-SR, ACU HW 05
- Compliant with AISG V2.0 and 3GPP
- AISG jumper cable included
- Mechanical down tilt kit included



### Technical features

#### ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Electrical Specification Header		Low Band Arrays (617-960 MHz) Ports 1-4			
Frequency Band	MHz	617-698	698-806	806-894	880-960
Gain	dBi	12.9	14.0	14.2	15.2
Azimuth Beamwidth 3dB	Deg	68 +/- 5	62 +/- 6	58 +/- 6	53 +/- 8
Elevation Beamwidth 3dB	Deg	19.7 +/- 1.5	16.9 +/- 1.0	15.1 +/- 1.5	13.5 +/- .5
Cross-Pol at Boresight	dB	20	21	23	26
F/B at 180° Copolar	dB	24	26	27	29
Electrical Downtilt	Deg	2 to 18	2 to 18	2 to 18	2 to 18
First Upper Side Lobe	dB	14	18	16	14
VSWR	-	1.5:1	1.5:1	1.5:1	1.5:1
Return Loss	dB	-14	-14	-14	-14
Cross Polar Isolation	dB	25	25	25	25
3rd Order PIM 2 x 43dBm	dBc	-153	-153	-153	-153
Maximum CW Power per Port	Watt	400	400	400	400
Gain Over All Tilts	dBi	12.4 +/- .5	13.5 +/- .5	13.7 +/- .5	13.9 +/- 1.3
Cross-Pol Over Sector	dB	9	6	2	1
F/B at +/-30° Total Power	dB	17	19	19	19
Upper Side Lobe Peak to +20	dB	22	22	17	14



## PRODUCT DATASHEET

## APXVAALL12\_43-U-NA20

8-Ports, X-Pol, Panel Antenna, 1.2m, 2x 617-960/2x 1695-2690 MHz 65deg, Integrated RET

ELECTRICAL SPECIFICATIONS						
Electrical Specification Header		Mid Band Arrays (1695-2690 MHz) Ports 5-8				
Frequency Band	MHz	1695-1880	1850-1990	1920-2200	2300-2500	2500-2690
Gain	dBi	15.6	15.9	16.3	16.0	17.0
Azimuth Beamwidth 3dB	Deg	69 +/- 4	67 +/- 3	67 +/- 4	64 +/- 6	60 +/- 7
Elevation Beamwidth 3dB	Deg	10.3 +/- .5	10.0 +/- 1	9.0 +/- 1	8.0 +/- 1	7.2 +/- .5
Cross-Pol at Boresight	dB	19	21	22	22	22
F/B at 180 Copolar	dB	32	33	33	29	28
Electrical Downtilt	Deg	2 to 12	2 to 12	2 to 12	2 to 12	2 to 12
First Upper Side Lobe	dB	19	20	18	15	15
VSWR	-	1.5:1	1.5:1	1.5:1	1.5:1	1.5:1
Return Loss	dB	-14	-14	-14	-14	-14
Cross Polar Isolation	dB	25	25	25	25	25
3rd Order PIM 2 x 43dBm	dBc	-153	-153	-153	-153	-153
Maximum CW Power per Port	Watt	300	300	300	300	300
Gain Over All Tilts	dBi	15.1 +/- .5	15.4 +/- .5	15.8 +/- .5	15.5 +/- .5	16.0 +/- 1.0
Cross-Pol over Sector	dB	9	8	6	1	1
F/B at +/-30 Total Power	dB	25	25	26	22	22
Upper Side Lobe Peak to +20	dB	16	16	17	15	14
ELECTRICAL SPECIFICATIONS						
Impedance	Ohm			50		
Polarization	Deg			+/- 45		
MECHANICAL SPECIFICATIONS						
Dimensions - H x W x D	mm (in)			1219 x 609 x 215 (48 x 24 x 8.5)		
Weight (Antenna Only)	kg (lb)			27 (60)		
Weight (Mounting Hardware only)	kg (lb)			4.5 (10)		
Packing size- HxWxD	mm (in)			1420 x 714 x 265 (55.9 x 28.1 x 10.4)		
Shipping Weight	kg (lb)			37 (82)		
Connector type				8 x 4.3-10 female at bottom		
Radome Material / Color				Fiber Glass / Light Grey RAL7035		
TESTING AND ENVIRONMENTAL						
Temperature Range	°C (°F)			-40 to 60 (-40 to 140 )		
Lightning protection				Direct Ground		
Survival/Rated Wind Velocity	km/h			240 (150 )		
Wind Load @Rated Wind Front	N			714		
Wind Load @Rated Wind Side	N			217		
Wind Load @Rated Wind Rear	N			772		
ORDERING INFORMATION						
Order No.	Configuration	Mounting Hardware	Mounting pipe Diameter	Shipping Weight		
APXVAALL12_43-U-NA20	ACU-A20-SR Field Replace RET included (2)	APM40-2 Beam tilt kit (included) APM40-E10 Interface (included)	60-120mm	37 Kg (82 lbs)		

APXVAALL12\_43-U-NA20

REV : G

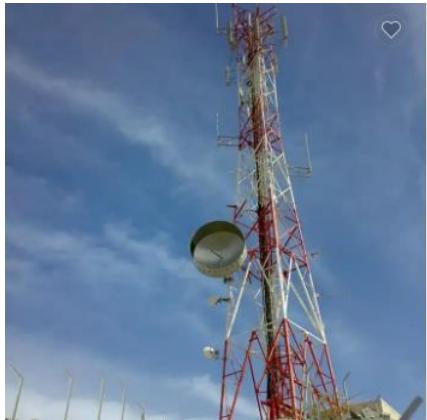
www.rfsworld.com

All values nominal unless tolerances provided; information contained in the present datasheet is subject to confirmation at time of ordering.

Page 2 of 4

## 1. Torre de Comunicación móvil

Puesto que estos precios son orientativos, para este caso se ha decidido incluir en el presupuesto el precio medio en euros de la torre mostrada en la imagen.



Torre de mástil de comunicación móvil, hdp galvanizado por inmersión en caliente, 60m

FOB Referencia Precio: [Consiga El Último Precio](#)

**900,00 US\$ - 1.100,00 US\$** / Tonelada métrica | 1 Tonelada métrica/Toneladas métricas (Pedido mínimo)

Beneficios: Reembolsos rápidos en pedidos de menos de 1000 USD [Reclamar ahora >](#)

Características: angle steel tower

Plazo de entrega:

Quantity (Toneladas métricas)	1 - 15	> 15
Hora del Est.(días)	14	Para negociar

<https://spanish.alibaba.com/p-detail/60m-1600524374971.html>

## 2. Instalación torre

El coste medio en euros recogido en el presupuesto, para la construcción de una torre de comunicación móvil en europa del oeste es el mostrado en la imagen.

- Este coste total incluye:
- **Pre-desarrollo:** compra del terreno, licencias o permisos entre otros.
- **Materiales directos:** como acero, vallado o iluminación.
- **Sitio de construcción:** excavación, vertido de hormigón para el anclaje o cimentación.

*Cost to Build a Cell Tower in Global Markets*

Market	Low Build Cost	High Build Cost	Average
United States	\$200,000	\$300,000	<b>\$250,000</b>
Western Europe	\$95,000	\$175,000	<b>\$135,000</b>
Latin America	\$85,000	\$135,000	<b>\$110,000</b>
Middle East	\$75,000	\$100,000	<b>\$87,500</b>
Africa	\$70,000	\$110,000	<b>\$90,000</b>
Indonesia	\$35,000	\$50,000	<b>\$42,500</b>
India	\$35,000	\$50,000	<b>\$42,500</b>
China	\$35,000	\$50,000	<b>\$42,500</b>

<https://dqtlinfra.com/how-much-does-it-cost-to-build-a-cell-tower/#:~:text=On%20average%2C%20the%20total%20cost,Latin%20America%20it%20is%2024110%2C000.>

## 2. Antena

La antena de la imagen siguiente cuenta con unas características similares a la de la red propuesta, ya que no ha sido posible obtener el precio de la propuesta. Sin más, tanto la antena como su precio son orientativos y el precio en euros indicado en el presupuesto es la media del rango indicado.



10 ports 698-960MHz/1695-2690MHz 14dBi/15dBi 1.6m , penta-band base station antenna 2G/3G/LTE antenna HXG4W651415DRNF

FOB Reference Price: [Get Latest Price](#)

**\$100.00 - \$500.00** / piece | 10 piece/pieces (Min. order)

Benefits: Quick refunds on orders under US \$1,000 [Claim now >](#)

Quantity:    pieces

[https://www.alibaba.com/product-detail/10-ports-698-960MHz-1695-2690MHz\\_62087767590.html?spm=a2700.details.0.0.32fe55det8CFLf](https://www.alibaba.com/product-detail/10-ports-698-960MHz-1695-2690MHz_62087767590.html?spm=a2700.details.0.0.32fe55det8CFLf)

## 3. Soporte montaje de antena

Precio por unidad indicado en euros en el presupuesto es el mostrado en la siguiente imagen.



CommScope

**Mounting Bracket for SBNHH-1D65C Antenna**

GSA NCNP TESCO SKU: 583839 UPC: 729198250218 QTY/UOM: 1/each MFG PART #: MTC3169SBNHH

[Sign In or Register for preferred pricing!](#)

**\$383<sup>64</sup>**

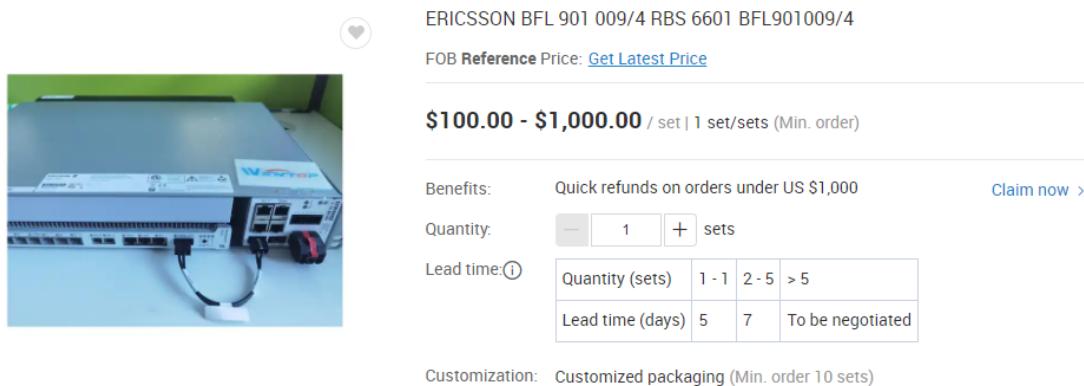
[Add To Cart](#)

COMMSCOPE's MTC3169SBNHH antenna mounting bracket for mounting SBNHH-1D65C antenna to a 6 in pole

<https://www.tessco.com/product/mounting-bracket-for-sbnhh-1d65c-antenna-583839>

#### 4. Estación base eNodeB (BBU y RRU)

Precio por unidad indicado en euros en el presupuesto es la media del mostrado en la siguiente imagen.



The screenshot shows a product listing for the ERICSSON BFL 901 009/4 RBS 6601 BFL901009/4. The price is listed as \$100.00 - \$1,000.00 / set | 1 set/sets (Min. order). Below the price, there are sections for Benefits (Quick refunds on orders under US \$1,000), Quantity (set to 1), Lead time (5 days), and Customization (Customized packaging (Min. order 10 sets)). A green button labeled "Claim now >" is visible in the top right corner.

[https://www.alibaba.com/product-detail/ERICSSON-BFL-901-009-4-RBS\\_1600283691149.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.26fb69e7fV33QI&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/ERICSSON-BFL-901-009-4-RBS_1600283691149.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.26fb69e7fV33QI&s=p)

#### 5. Armario exterior de telecomunicaciones

Precio por unidad indicado en euros en el presupuesto es el mostrado en la siguiente imagen.



The screenshot shows a product page for a Rack exterior 19" IP65 24U 600 x 600 termoaislado. It features five small images of the rack from different angles. A green ribbon badge on the right says "Envío Gratis". The product description states it's designed for outdoor installation, providing protection against the elements. Reference number RET366.11 is mentioned, along with availability status. The price is listed as 1.764,16 € IVA incluido and 1.457,98 € sin IVA. A quantity selector shows '1', and buttons for "Añadir al carrito" (Add to cart) and "Presupuesto" (Quote) are at the bottom.

<https://www.rackonline.es/rack-exterieores-ip55-ip65/rack-exterior-19-ip65-24u-600-x-600-.html>

## 6. Refugio de la torre de telecomunicaciones

Precio por unidad indicado en euros en el presupuesto es el mostrado en la siguiente imagen.



Telecom shelter for telecommunication tower site

>= 1 sets  
**\$4,880.00**

Benefits: Quick refunds on orders under US \$1,000

Specification customization

Samples: customization  
**\$5,088.00/set** | Min. order : 1 set | Get samples

Lead time: ⓘ

Quantity (sets)	1 - 5	> 5
Lead time (days)	30	To be negotiated

[https://www.alibaba.com/product-detail/Telecom-shelter-for-telecommunication-tower-site\\_1600501090261.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Telecom-shelter-for-telecommunication-tower-site_1600501090261.html)

## 7. Sistema de protección de rayos

Como en nuestro caso las torres están situadas en un entorno rural donde no existen ningún tipo de edificios o estructuras, se ha decidido escoger el pararrayos más económico de acuerdo a la información mostrada en la siguiente imagen, ya que, si existe un riesgo a daños mecánicos y consecuentemente a un incendio, por tanto, es necesario proteger ambas torres.



SERVICIOS ▾ OFERTAS DE TRABAJO

PRECIOS DE INSTALACIÓN DE PARARRAYOS

Tipo de pararrayos	Precio
Pararrayos de punta Franklin	5.000 €
Pararrayos de malla conductora	6.800 €
Pararrayos con dispositivo de cebado	6.100 €

<https://www.cronoshare.com/cuanto-cuesta/instalar-pararrayos#:~:text=La%20instalaci%C3%B3n%20de%20sistemas%20de,y%20m%C3%A1s%20de%209.000%20%E2%82%AC.>