

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**Red de Acceso de Banda Ancha
mediante WiMAX Móvil (IEEE 802.16e)**

Sonia Villar Pascual

Abril 2010

Red de Acceso de Banda Ancha
mediante WiMAX Móvil
(IEEE 802.16e)

AUTOR: Sonia Villar Pascual

TUTOR: D. Bazil Taha Ahmed

Grupo de Sistemas de Radiocomunicaciones y
Comunicaciones Ópticas
Dpto. de Ingeniería Informática
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Abril 2010

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, Bazil Taha, toda la dedicación y el esfuerzo que ha dedicado a mi proyecto fin de carrera. No sólo es un magnífico tutor sino también un excelente profesor y sobre todo, una gran persona. Muchas gracias por tu trabajo diario, por las ganas y empeño que transmites, por tu cercanía; ha sido todo un lujo desarrollar este proyecto contigo como tutor.

Agradecer también a los profesores de la universidad darme la oportunidad de aprender y formarme; en especial a Ángel Ferreiro que me enseñó a luchar por mis ilusiones y a perseguir mis metas, a Silvia Teresita Acuña por darme la oportunidad de trabajar junto a ella, a Gustavo Sutter porque es un señor profesor y si cabe mejor persona, a José Luis Masa por su buen hacer y por transmitir día a día pasión por la enseñanza y a Luis Mendo por su motivación y sus ganas de enseñar.

En segundo lugar quería dedicar este proyecto a mi familia por todo el amor que me brindan cada día: a mi padre, José Luis, que desde muy pequeña me ha enseñado a esforzarme al máximo en cada tarea que llevo a cabo, a no rendirme nunca y a intentar dar siempre lo mejor de mi; a mi madre, María José, por darme la vida, por apoyarme y preocuparse a todas horas por mi y por regalarme tanto amor y a mi hermana, Mónica, por ser tan maravillosamente buena conmigo, por estar pendiente de mi y por demostrarme todo su cariño cada día. Sabéis que os adoro, que sois mi vida y que este proyecto también es vuestro por toda lo que me dais cada día. Estoy muy orgullosa de vosotros y muy feliz de tener una familia sensacional.

En tercer lugar, me gustaría nombrar a la persona más increíble que tuve la suerte de encontrar hace 5 años en esta universidad, mi novio Álvaro. Esta carrera me brindó la oportunidad de conocerte y siempre estaré eternamente agradecida. Has estado siempre conmigo y sé que seguirás ahí toda la vida. Estoy segura que cuando seamos mayores les contaremos a nuestros nietos como nos conocimos en la EPS. Mil gracias por apoyarme en todos los momentos, por quererme tanto y por hacerme tan feliz. Sabes que contigo puedo decir que encontré al hombre de mi vida. Para ti, 2 words.

Esta carrera no hubiese sido lo mismo sin mi gran amiga de aventuras y andanzas universitarias y no tan universitarias. Este proyecto te lo dedico también a ti, Marilia, una señora con todas las letras. Quién me iba a decir que entre redes, economía y transmisión de datos iba a conocer a la gran Marilita; y sobre todo como me iba a imaginar que detrás de esa persona que huía de las muestras de cariño en exceso, estaba mi mitad del lado oscuro. Todas las risas, todas las historias que hemos vivido y lo que nos queda... Te lo dije un día y te lo vuelvo a repetir: Derrumbaste la muralla y entraste en el grupo de confianza ciega y total. Puedo decir muy orgullosa que no me arrepiento de lo que y los que quedaron atrás porque sin duda a mi lado tengo a la mejor: Xinpi muchas manos siempre; como te dije un día la vida no nos trata mal. Tampoco me puedo olvidar de una chica que vino en el pack y que fue lo mejor tener la suerte de conocerte, esa gallega-ibicenca-madrileña, Merinxi. Muchas gracias por ser un tía 10, por las tardes de “cofite”, las comidas en el Foster’s, las cenas del chino, las fiestecillas varias, las historias de telenovela, los comentarios sobre el confesionario de Kiko y sobre todo por el tratamiento profesional de mi “hematofobia”. Para las dos tengo pendiente una visita a la mejor isla, la “isla blanca”, esa dónde nunca se hace de día.

Además, quiero agradecer a mis compañeros de Telefónica todo el apoyo y ánimo que me han brindado para finalizar la carrera durante este año de prácticas. Han sido once meses fantásticos llenos de buenos momentos donde me habéis enseñado mucho profesionalmente y sobre todo, me habéis ayudado a crecer personalmente.

No puedo olvidarme de dar las gracias a mi consejero particular que ha seguido y se ha interesado por las idas y venidas de mi proyecto fin de carrera desde sus remotos inicios y por mil cosas más. Desde el primer día me ofreciste tu amistad, tu apoyo y tus sabios consejos sobre el proyecto, el trabajo y sobre la vida; de verdad que te lo agradezco muchísimo. Siempre serás mi top number 1.

También dedicar este proyecto a Moni y Patri, por las fiestas vividas, las historias contadas y las que jamás se contarán. Muchas gracias porque me queréis tal como soy con mis defectos y virtudes y porque me habéis dado vuestra amistad sin pedir nada a cambio.

Por último y, para mí la más importante, quiero dedicar este proyecto a mi abuelita que aunque no pueda verlo, se que allá donde esté estará muy orgullosa de mí. No había terminado el colegio y ya sabía que su nieta, su “grandota” iba a ser ingeniera. Me dio todo su amor de forma incondicional y me enseñó que en este mundo aún existen personas con un corazón inmenso llenas de bondad. Te quiero y te echo mucho de menos. Siempre te llevo conmigo.

De todo corazón, gracias a todos vosotros por haberme ayudado a ser ingeniera de telecomunicación.

Sonia.

Resumen

WiMAX son las siglas de *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (Interoperabilidad mundial para acceso por microondas¹). Es una norma de transmisión de datos usando ondas de radio. Es una tecnología dentro de las conocidas como tecnologías de última milla (*last mille*²), también conocidas como bucle local, que permite la recepción de datos por microondas y retransmisión por ondas de radio. El protocolo en el que se basa esta tecnología es el **IEEE 802.16**³. Una de sus ventajas es dar servicios de banda ancha en zonas donde el despliegue de cobre, cable o fibra por la baja densidad de población presenta unos costes por usuario muy elevados (zonas rurales).

El único organismo habilitado para certificar el cumplimiento del estándar y la interoperabilidad entre equipamiento de distintos fabricantes es el **WiMAX Forum**. Todo equipamiento que no cuente con esta certificación no puede garantizar su interoperabilidad con otros productos.

Los perfiles del equipamiento que existen actualmente en el mercado, compatibles con **WiMAX**, son mayoritariamente para las frecuencias de 2,5 y 3,5 GHz (con licencia), si bien ya existen varios fabricantes que han obtenido la certificación **WiMAX Forum** para las frecuencias de uso libre de 5,4GHz, frecuencias coincidentes con WiFi 802.11⁴ ó IEEE 802.11n⁵.

Existen planes para desarrollar perfiles de certificación y de interoperabilidad para equipos que cumplan el estándar **IEEE 802.16e** (lo que posibilitará la movilidad), así como una solución completa para la estructura de red que integre tanto el acceso fijo como el móvil. Se prevé el desarrollo de perfiles para entorno móvil en las frecuencias con licencia de 2,3 y 2,5 GHz.

¹ Se denomina microondas a las ondas electromagnéticas definidas en un rango de frecuencias determinado; generalmente de entre 300 MHz y 300 GHz, que supone una longitud de onda en el rango de 1 m a 1 mm.

² Con el término última milla (*last mille*) nos referimos al "bucle local", conexión del "último kilómetro" al local del usuario, independientemente de la tecnología. De ahí la frase "bucle local inalámbrico", donde este último tramo no es un par físico cableado sino un enlace vía radio.

³ IEEE 802.16 es el nombre de un grupo de trabajo del comité IEEE 802 y el nombre se aplica igualmente a los trabajos publicados. Se trata de una especificación para las redes de acceso metropolitanas inalámbricas de banda ancha fijas (no móvil) publicada inicialmente el 8 de abril de 2002. En esencia recoge el estándar de facto WiMAX.

⁴ El estándar IEEE 802.11 o Wi-Fi de IEEE define el uso de los dos niveles inferiores de la arquitectura OSI (capas física y de enlace de datos), especificando sus normas de funcionamiento en una WLAN.

⁵ WiFi N ó 802.11n es un estándar de IEEE que ya se ha ratificado y que sube el límite teórico hasta los 600 Mbps. Actualmente ya existen varios productos que cumplen el estándar n con un máximo de 300 Mbps. El estándar 802.11n hace uso simultáneo de ambas bandas, 2,4 GHz y 5,4 GHz.

Actualmente se recogen dos variantes dentro del estándar IEEE 802.16:

- Uno de **acceso fijo, 802.16d**, en el que se establece un enlace radio entre la estación base y un equipo de usuario situado en el domicilio del usuario. Para el entorno fijo, las velocidades teóricas máximas que se pueden obtener son de 70 Mbps con un ancho de banda de 20 MHz. Sin embargo, en entornos reales se han conseguido velocidades de 20 Mbps con radios de célula de hasta 6 kilómetros, ancho de banda que es compartido por todos los usuarios de la célula.
- La otra variante, **802.16e**, es de **movilidad completa** y permite el desplazamiento del usuario de un modo similar al que se puede dar en GSM/UMTS⁶. Aún no se encuentra desarrollado y actualmente compite con la tecnología LTE⁷, basadas en femtoceldas⁸ conectadas mediante cable. Por ser la alternativa para las operadoras de telecomunicaciones que apuestan por los servicios en movilidad, este estándar, en su variante “no licenciado”, compite con el IEEE 802.11n, ya que la mayoría de los portátiles y dispositivos móviles, empiezan a estar dotados de este tipo de conectividad.

Palabras clave

- Ancho de banda.
- Antena.
- Arquitectura de red.
- Banda ancha móvil.
- Banda de frecuencias.
- Capa física.
- Capa MAC.

⁶ GSM, Sistema Global para las Comunicaciones Móviles, se considera, por su velocidad de transmisión y otras características, un estándar de segunda generación (2G). Su extensión a 3G se denomina UMTS, Sistema Universal de Telecomunicaciones móviles, y difiere en su mayor velocidad de transmisión, el uso de una arquitectura de red ligeramente distinta y sobre todo en el empleo de diferentes protocolos de radio.

⁷ LTE (Long Term Evolution) es un nuevo estándar de la norma 3GPP. Definida para unos como una evolución de la norma 3GPP UMTS (3G) para otros un nuevo concepto de arquitectura evolutiva (4G). De hecho LTE será la clave para el despegue del internet móvil, servicios como la transmisión de datos a más de 300 metros y videos de alta definición, gracias a la tecnología OFDMA, serán de uso corriente en la fase madura del sistema.

⁸ Las femtoceldas son un claro ejemplo de convergencia fijo-móvil en las redes de acceso. Una femtocelda es una estación base en miniatura, que se integra con la red móvil mediante una conexión de banda ancha. Cuando el usuario está dentro de la cobertura de la femtocelda puede acceder a la red móvil.

- CPE (Equipo local de cliente).
- Eficiencia espectral.
- IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).
- IEEE 802.16.
- LOS (Visión directa).
- Modulación
- Macrocela.
- Multitrayecto.
- NLOS (Sin Línea de Vista).
- OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales).
- OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal).
- QAM
- Red de acceso.
- Red inalámbrica.
- SNIR
- SNR.
- Tasa binaria de descarga.
- TDD (División de Tiempo Dúplex).
- Throughput.
- Usuario.
- WiMAX Forum.
- WiMAX/ WiMAX móvil.
- WLAN (Red Inalámbrica de Área local)

Abstract

WiMAX, meaning **Worldwide Interoperability for Microwave Access**, is a telecommunications technology that provides wireless transmission of data using a variety of transmission modes, from point-to-multipoint links to portable and fully mobile internet access. The technology provides up to 10 Mbps broadband speeds without the need for cables. The technology is based on the **IEEE 802.16** standard (also called Broadband Wireless Access). The name "WiMAX" was created by the **WiMAX Forum**, which was formed in June 2001 to promote conformity and interoperability of the standard. The forum describes WiMAX as "a standards-based technology enabling the delivery of last mile wireless broadband access as an alternative to cable and DSL", also known as local loop. One advantage is to provide broadband services in areas where cable or fiber deployment by the low population density presents a very high cost per user (rural areas).

The only body authorized to certify standard compliance and interoperability between equipment from different manufacturers is the **WiMAX Forum**: any equipment that does not have this certification, it cannot be guaranteed its interoperability with other products.

The profiles of equipment that are currently on the market compatible with **WiMAX** are for frequencies of 2.5 and 3.5 GHz as seen in the database of the **WiMAX Forum**.

Apart from authorized equipment, there is another type of equipment (not standard) using license-free frequency of 5.4 GHz, all for fixed access applications. Nevertheless, this case involves equipment that is not compatible among different manufacturers.

There are plans to develop profiles for interoperability certification and equipment that meet the **IEEE 802.16e** standard, which will allow mobility, as well as a complete solution for the network structure that integrates both the fixed and the mobile access. It foresees the development of profiles for mobile environment in licensed frequencies at 2.3 and 2.5 GHz.

There are two variants currently collected within the 802.16 standard:

- **802.16-2004** is often called **802.16d**, since that was the working party that developed the standard. It is also frequently referred to as "**fixed WiMAX**" since it has no support for mobility. This standard establishes a radio link between base station and user equipment located on the user's home. Regarding a fixed environment, the maximum theoretical speeds that are available are 70 Mbps with a bandwidth of 20 MHz. However, in real environments, it has been achieved speeds of 20 Mbps with cell radii of up to 6 km where the bandwidth is shared by all the users of the cell.

- **802.16e-2005** is an amendment to 802.16-2004 and is often referred to in shortened form as **802.16e**. It introduced support for mobility, among other things and is therefore also known as "**mobile WiMAX**". It allows the movement of the user in a way similar to what may occur in GSM / UMTS. It currently competes with the technologies LTE, as the alternative for telecom operators that opt for mobility services. This standard also competes with the IEEE 802.11n WiFi, since most laptops and mobile devices, are beginning to be equipped with this type of connectivity.

The bandwidth and range of **WiMAX** make it suitable for the following potential applications:

- Connecting Wi-Fi hotspots to the Internet.
- Providing a wireless alternative to cable and DSL for "last mile" broadband access.
- Providing data and telecommunications services.
- Providing a source of Internet connectivity as part of a business continuity plan. That is, if a business has both a fixed and a wireless Internet connection, especially from unrelated providers, they are unlikely to be affected by the same service outage.
- Providing portable connectivity.

Key words

- Access network.
- Antenna.
- Bandwidth.
- CPE (Customer Premises Equipment).
- Downlink bit rate.
- Frequency bands.
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
- IEEE 802.16.
- LOS (Line Of Sight).
- MAC layer.
- Macro cell.
- Mobile broadband.
- Modulation.
- Multipath loss.
- Network architecture.
- NLOS (Non Line of Sight).
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).
- Physical layer.
- QAM
- SNIR (Signal to Noise/Interference Ratio).
- SNR (Signal to Noise Ratio).
- Spectral efficiency.
- TDD (Time Division Duplex).
- Throughput.
- User.
- WiMAX Forum.
- WiMAX/ WiMAX Mobile.
- Wireless network.
- WLAN (Wireless Local Area Network).

Índice de contenidos.

1.INTRODUCCIÓN.....	- 16 -
1.1. MOTIVACIÓN.....	- 17 -
1.2. OBJETIVOS.....	- 18 -
1.3. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	- 19 -
2. DESCRIPCIÓN DE WIMAX MOBILE.....	- 20 -
2.1. INTRODUCCIÓN A LA BANDA ANCHA MÓVIL.....	- 21 -
2.2. EVOLUCIÓN DE LA BANDA ANCHA MÓVIL.....	- 23 -
2.2.1. <i>WiMAX y otras tecnologías de banda ancha móvil.....</i>	<i>- 26 -</i>
2.2.1.1. Acceso inalámbrico de banda ancha: inicio de WiMAX.....	- 27 -
2.2.1.2. 3G: UMTS y HSPA.....	- 28 -
2.2.1.3. Sistemas WiFi.....	- 29 -
2.2.1.4. 4G: LTE y WiMAX móvil.....	- 31 -
2.3. INTRODUCCIÓN A MOBILE WIMAX (IEEE 802.16E).....	- 34 -
2.3.1. <i>Orígenes del IEEE 802.16.....</i>	<i>- 34 -</i>
2.3.2. <i>Evolución de IEEE 802.16.....</i>	<i>- 35 -</i>
2.3.3. <i>Características sobresalientes de Mobile WiMAX.....</i>	<i>- 39 -</i>
2.3.3.1. En la capa física (PHY).....	- 39 -
2.3.3.2. En la capa de acceso al medio (MAC).....	- 41 -
2.4. ESTUDIO DE WIMAX MOBILE IEEE 802.16E.....	- 42 -
2.4.1. <i>Capa física (PHY) de WiMAX Mobile.....</i>	<i>- 42 -</i>
2.4.1.1. Frecuencias de operación y ancho de banda del canal.....	- 44 -
2.4.1.1.1. Banda libre de 5GHz.....	- 44 -
2.4.1.1.2. Banda con licencia de 3,5GHz.....	- 44 -
2.4.1.1.3. Banda mixta de 2,5GHz.....	- 45 -
2.4.1.1.4. Otras bandas de frecuencia.....	- 45 -
2.4.1.2. Modulación adaptativa.....	- 46 -
2.4.1.3. Técnicas de corrección de errores.....	- 49 -
2.4.1.4. Técnicas de control de potencia en el enlace ascendente (uplink).....	- 50 -
2.4.2. <i>Capa de Acceso al Medio (MAC) de WiMAX Mobile.....</i>	<i>- 50 -</i>
2.4.2.1. Control de la movilidad en WiMAX.....	- 51 -
2.4.3. <i>OFDM y OFDMA.....</i>	<i>- 52 -</i>
2.4.4. <i>Técnicas avanzadas en WiMAX móvil.....</i>	<i>- 56 -</i>
2.4.4.1. Diversidad.....	- 56 -
2.4.4.2. Antenas inteligentes (<i>smart antennas</i>).....	- 56 -
2.4.4.3. MIMO (<i>Multiple Input Multiple Output</i>).....	- 57 -
2.4.4.4. Esquema mejorado de reutilización de frecuencias.....	- 59 -
2.5. ARQUITECTURA DE RED WIMAX.....	- 59 -
2.6. CONVERGENCIA DE WIMAX.....	- 62 -
2.7. NUEVA GENERACIÓN DE MOBILE WIMAX: IEEE 802.16m.....	- 64 -
2.7.1. <i>Introducción.....</i>	<i>- 64 -</i>
2.7.2. <i>Características principales de IEEE 802.16m.....</i>	<i>- 65 -</i>
2.7.3. <i>Mejoras en la próxima generación de WiMAX Mobile.....</i>	<i>- 67 -</i>
2.7.4. <i>4G: IEEE 802.16m.....</i>	<i>- 67 -</i>
2.8. WIMAX: PASADO, PRESENTE Y FUTURO.....	- 69 -

2.9.	VENTAJAS DE WiMAX.....	- 71 -
2.10.	APLICACIONES DE WiMAX.	- 72 -
3.	DISEÑO, SIMULACIONES Y RESULTADOS.	- 74 -
3.1	SIMULACIONES DE UN SISTEMA WiMAX MULTICELDAS UTILIZANDO CLÚSTER DE 7 CELDAS PARA LA BANDA DE 3.5 GHZ PARA USUARIOS EN UN EDIFICIO CON LA SEÑAL Y LAS INTERFERENCIAS ATRAVESANDO LA FACHADA DEL EDIFICIO.....	- 75 -
a)	<i>Modelo de Propagación Erceg.</i>	- 76 -
b)	<i>Cálculo del enlace (Link Budget).</i>	- 78 -
c)	<i>Cálculo de la ganancia de la antena transmisora.</i>	- 80 -
d)	<i>Cálculo de las múltiples interferencias cocanal.....</i>	- 81 -
3.1.1.	<i>Zona urbana.</i>	- 82 -
3.1.1.1.	Altura de la antena del usuario de 1 metro.....	- 83 -
3.1.1.2.	Altura de la antena del usuario de 4 metros.	- 86 -
3.1.1.3.	Altura de la antena del usuario de 7 metros.	- 89 -
3.1.1.4.	Altura de la antena del usuario de 10 metros.	- 92 -
3.1.1.5.	Valor medio de tasa binaria para los usuarios en el edificio.	- 95 -
3.1.2.	<i>Zona suburbana.....</i>	- 97 -
3.1.2.1.	Altura de la antena del usuario de 1 metro.....	- 98 -
3.1.2.2.	Altura de la antena del usuario de 4 metros.	- 101 -
3.1.2.3.	Altura de la antena del usuario de 7 metros.	- 104 -
3.1.2.4.	Altura de la antena del usuario de 10 metros.	- 107 -
3.1.2.5.	Valor medio de tasa binaria de descarga para los usuarios en el edificio.	- 110 -
3.1.3.	<i>Área rural.....</i>	- 112 -
3.1.3.1.	Altura de la antena del usuario de 1 metro.....	- 113 -
3.1.3.2.	Altura de la antena del usuario de 4 metros.	- 116 -
3.1.3.3.	Altura de la antena del usuario de 7 metros.	- 119 -
3.1.3.4.	Altura de la antena del usuario de 10 metros.	- 122 -
3.1.3.5.	Valor medio de tasa binaria de descarga para los usuarios en el edificio.	- 125 -
3.2.	SIMULACIONES DE UN SISTEMA WiMAX MULTICELDAS UTILIZANDO CLÚSTER DE 7 CELDAS PARA LA BANDA DE 3.5 GHZ PARA USUARIOS MÓVILES.....	- 127 -
3.2.1.	<i>Zona urbana.</i>	- 128 -
3.2.1.1.	Valores de tasa binaria de descarga.	- 129 -
3.2.2.	<i>Zona suburbana.....</i>	- 131 -
3.2.2.1.	Valores de tasa binaria de descarga.	- 132 -
3.2.3.	<i>Zona rural.</i>	- 134 -
3.2.3.1.	Valores de tasa binaria de descarga.	- 135 -
3.3.	SIMULACIONES DE UN SISTEMA WiMAX MULTICELDAS UTILIZANDO CLÚSTERES DE 7 CELDAS PARA LA BANDA DE 3.5 GHZ PARA USUARIOS EN UN EDIFICIO CON LA SEÑAL Y LAS INTERFERENCIAS ATRAVESANDO LA VENTANA DEL EDIFICIO.....	- 137 -
3.3.1.	<i>Zona urbana.</i>	- 138 -
3.3.2.	<i>Zona suburbana.....</i>	- 139 -
3.3.3.	<i>Zona rural.</i>	- 140 -
3.3.4.	<i>Tasas binarias medias de descarga para las tres zonas bajo estudio: urbana, suburbana y rural.....</i>	- 141 -
3.4.	COMPARATIVA DEL RADIO MÁXIMO DE TRABAJO DE CELDA EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS DE COMUNICACIONES PARA SISTEMAS WiMAX MULTICELDAS UTILIZANDO CLÚSTER DE 7 CELDAS EN LA BANDA DE 3.5 GHZ.	- 143 -
4.	APLICACIONES WiMAX: ANÁLISIS DE RESULTADOS EN DIFERENTES ZONAS URBANAS.	- 145 -
4.1.	CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN WiMAX.	- 146 -

4.1.1.	<i>Cálculo de la cantidad de celdas necesarias según la superficie.</i>	- 147 -
4.1.2.	<i>Cálculo de la cantidad de celdas necesarias según la población.</i>	- 147 -
4.2.	ESCENARIO MADRID-BAGDAD.	- 149 -
4.2.1.	<i>Municipio de Madrid.</i>	- 149 -
4.2.1.1.	Planificación de WiMAX indoor.	- 150 -
4.2.1.1.1.	Resultados para requisito del usuario de descarga de 50 Mbyte y 100 Mbyte diaria.	- 150 -
4.2.1.2.	Planificación de WiMAX móvil.	- 151 -
4.2.2.	<i>Municipio de Bagdad.</i>	- 152 -
4.2.2.1.	Planificación de WiMAX indoor.	- 153 -
4.2.2.1.1.	Resultados para requisito del usuario de descarga de 50 Mbyte y 100 Mbyte diaria.	- 153 -
4.2.2.2.	Planificación de WiMAX móvil.	- 154 -
4.3.	ESCENARIO BARCELONA-MOSUL.	- 155 -
4.3.1.	<i>Municipio de Barcelona</i>	- 155 -
4.3.1.1.	Planificación de WiMAX indoor.	- 156 -
4.3.1.1.1.	Resultados para requisito del usuario de descarga de 50 Mbyte y 100 Mbyte diaria.	- 156 -
4.3.1.2.	Planificación de WiMAX móvil.	- 157 -
4.3.2.	<i>Municipio de Mosul.</i>	- 158 -
4.3.2.1.	Planificación de WiMAX indoor.	- 159 -
4.3.2.1.1.	Resultados para requisito del usuario de descarga de 50 Mbyte y 100 Mbyte diaria.	- 159 -
4.3.2.2.	Planificación de WiMAX móvil.	- 160 -
4.4.	SUMARIO DE LAS APLICACIONES WIMAX INDOOR.	- 161 -
4.5.	SUMARIO DE LAS APLICACIONES WIMAX MÓVIL.	- 162 -
4.6.	COMPARACIÓN DE LAS APLICACIONES WIMAX PORTÁTIL (INDOOR) Y WIMAX FIJO (OUTDOOR).	- 163 -
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.	- 164 -
5.1.	CONCLUSIONES.	- 165 -
5.2.	TRABAJO FUTURO.	- 167 -
	REFERENCIAS	- 168 -
	BIBLIOGRAFÍA	- 170 -
	GLOSARIO	- 171 -
	ANEXO A: EXTENSIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN DE ERCEG PARA ALTURAS DE ANTENA RECEPTORA SUPERIORES A 10 METROS.	- 174 -
A.1.	VALORES DE TASA BINARIA DE DESCARGA PARA DIFERENTES ALTURAS DE ANTENAS RECEPTORAS.	- 178 -
A.1.1	<i>Altura de la antena receptora de 10 metros.</i>	- 178 -
A.1.2	<i>Altura de la antena receptora de 13 metros.</i>	- 178 -
A.1.3	<i>Altura de la antena receptora de 16 metros.</i>	- 179 -
A.1.4	<i>Altura de la antena receptora de 19 metros.</i>	- 179 -
A.1.5	<i>Altura de la antena receptora de 22 metros.</i>	- 180 -
A.1.6	<i>Altura de la antena receptora de 25 metros.</i>	- 180 -
A.1.7	<i>Altura de la antena receptora de 28 metros.</i>	- 181 -
A.1.8	<i>Altura de la antena receptora de 31 metros.</i>	- 181 -
A.2.	COMPARATIVA DE VALORES MEDIOS DE TASA BINARIA DE DESCARGA.	- 182 -
A.2.1	<i>Tasa binaria media para alturas entre 1 y 10 metros.</i>	- 182 -
A.2.2	<i>Tasa binaria media para alturas entre 10 y 40 metros.</i>	- 182 -
A.2.3	<i>Tasa binaria media para alturas entre 1 y 40 metros.</i>	- 182 -
A.3.	GRÁFICAS DE SINR.	- 183 -

A.3.1	<i>Altura de la antena receptora de 13 metros.....</i>	- 183 -
A.3.2	<i>Altura de la antena receptora de 16 metros.....</i>	- 183 -
A.3.3	<i>Altura de la antena receptora de 19 metros.....</i>	- 184 -
A.3.4	<i>Altura de la antena receptora de 22 metros.....</i>	- 184 -
A.3.5	<i>Altura de la antena receptora de 25 metros.....</i>	- 185 -
A.3.6	<i>Altura de la antena receptora de 28 metros.....</i>	- 185 -
A.3.7	<i>Altura de la antena receptora de 31 metros.....</i>	- 186 -
ANEXO B: ELEMENTOS DE LA ARQUITECTURA WIMAX MÓVIL.....		- 187 -
B.1.	DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN BASE WIMAX MOBILE.	- 189 -
B.2.	DESCRIPCIÓN DE LA ANTENA DE LA ESTACIÓN BASE WIMAX.	- 191 -
B.3.	DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN SUSCRIPTORA INDOOR DE WIMAX.	- 192 -
B.4.	DESCRIPCIÓN DE LA TARJETA WIMAX MOBILE PARA EL ORDENADOR.	- 193 -
B.5.	COSTE APROXIMADO DE LAS ESTACIONES BASE WIMAX.	- 194 -
B.6.	OTRAS ESTACIONES BASE WIMAX.	- 196 -
B.6.	OTROS ELEMENTOS RECEPTORES WIMAX.	- 199 -
PRESUPUESTO.....		- 201 -
PLIEGO DE CONDICIONES		- 202 -

Índice de Figuras.

Figura 2-1: Usuarios de Internet en todo el mundo dividido por zonas geográficas.	- 21 -
Figura 2- 2: Incremento neto del número mundial de abonados de banda ancha en el periodo temporal de Q1 2007 – Q4 2009.	- 22 -
Figura 2- 3: Evolución de las generaciones en comunicaciones móviles.	- 23 -
Figura 2- 4: Logos de las organizaciones responsables de los estándares WiMAX, LTE y UMB, respectivamente.	- 25 -
Figura 2- 5: Principales características de los estándares WiMAX, LTE y UMB.....	- 25 -
Figura 2- 6: Evolución de las tecnologías de banda ancha móvil.	- 26 -
Figura 2- 7: Evolución de las tecnologías 3G y sus lanzamientos (releases [R]).	- 29 -
Figura 2- 8: Evolución y diferencias de los estándares de los grupos IEEE 802.11 y 802.16.	- 30 -
Figura 2- 9: Escenario de evolución de las tecnologías inalámbricas.	- 31 -
Figura 2- 10: Arquitectura de Internet inalámbrica basada en los protocolos de la familia IEE 802... ..	- 34 -
Figura 2- 11: Logo oficial del organismo WiMAX Forum, responsable del estándar WiMAX. ..	- 35 -
Figura 2- 12: Requisitos fundamentales de WiMAX.	- 36 -
Figura 2- 13: Evolución de la familia de estándares IEEE 802.16.	- 37 -
Figura 2- 14: Logo oficial del estándar WirelessMAN 802.16 de IEEE.	- 37 -
Figura 2- 15: Evolución de las prioridades de WiMAX.	- 39 -
Figura 2- 16: Esquema simplificada de los tipos de portadoras en OFDM.....	- 42 -
Figura 2- 17: Bandas de frecuencia de WiMAX según la distribución geográfica.	- 46 -
Figura 2- 18: Diagrama de constelaciones de algunas modulaciones digitales soportada por WiMAX.	- 47 -
Figura 2- 19: Diagrama de la constelación de 64QAM ideal y con imperfecciones: interferencia, ruido y jitter.	- 47 -
Figura 2- 20: Subcapas de la capa MAC IEEE 802.16.....	- 51 -
Figura 2- 21: Propagación multitrayecto característica de las comunicaciones móviles.	- 52 -
Figura 2- 23: Portadoras ortogonales en OFDM.	- 53 -

Figura 2- 24: Comparación entre las modulaciones OFDM y FDM.	- 53 -
Figura 2- 25: Mejora de la eficiencia espectral de OFDM respecto FDM.	- 54 -
Figura 2- 26: OFDMA, técnica de acceso al medio de WiMAX.	- 55 -
Figura 2- 27: Sistemas de Antenas Adaptativas.	- 57 -
Figura 2- 28: Ejemplo de antenas MIMO en WiMAX.	- 58 -
Figura 2- 29: Esquema de reutilización de frecuencias en WiMAX Mobile.	- 59 -
Figura 2- 30: Arquitectura básica de la red WiMAX.	- 60 -
Figura 2- 31: Esquema de arquitectura de red WiMAX basada en IP.	- 61 -
Figura 2- 32: Modelo de simulación simplificado de una red WiMAX.	- 62 -
Figura 2- 33: Escenario de convergencia entre 3GPP, 3GPP2, WiFi y WiMAX.	- 63 -
Figura 2- 34: Coexistencia de las tecnologías inalámbricas.	- 64 -
Figura 2- 35: Evolución cronológica de los estándares de IEEE, 3GPP y 3GPP2.	- 67 -
Figura 2- 36: Comercialización de productos y estándares de 802.16m.	- 69 -
Figura 2- 37: Mobile WiMAX posibilita diferentes formas de conexión en una misma red.	- 70 -
Figura 2- 38: Previsión de usuarios de WiMAX por región (2007-2012).	- 70 -
Figura 2- 39: Previsiones del número de abonados de WiMAX Mobile (2009-2015).	- 71 -
Figura 2- 40: Conexiones WiMAX en las distintas aplicaciones (2008-2014).	- 73 -
Figura 3- 1: Valores experimentales obtenidos en la ciudad de Seattle.	- 76 -
Figura 3- 2: Esquema gráfico de la modulación adaptativa en nuestro escenario punto-multipunto simulado.	- 78 -
Figura 3- 3: Esquema del sistema celular para el cálculo de las interferencias cocanal.	- 81 -
Figura 3- 4: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.	- 83 -
Figura 3- 5: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.	- 84 -
Figura 3- 6: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.	- 85 -
Figura 3- 7: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.	- 86 -

Figura 3- 8: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda..... - 87 -

Figura 3- 9: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda. - 88 -

Figura 3- 10: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda. - 89 -

Figura 3- 11: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda. - 90 -

Figura 3- 12: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda. - 91 -

Figura 3- 13: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda. - 92 -

Figura 3- 14: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda. - 93 -

Figura 3- 15: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda. - 94 -

Figura 3- 16: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona urbana con una anchura de haz de 60°. - 95 -

Figura 3- 17: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona urbana con una anchura de haz de 90°. - 96 -

Figura 3- 18: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona urbana con una anchura de haz de 120°. - 96 -

Figura 3- 19: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda. - 98 -

Figura 3- 20: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda. - 99 -

Figura 3- 21: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda. - 100 -

Figura 3- 22: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda. - 101 -

Figura 3- 23: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda. - 102 -

Figura 3- 24: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda. - 103 -

Figura 3- 25: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda. - 104 -

Figura 3- 26: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda. - 105 -

Figura 3- 27: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda. - 106 -

Figura 3- 28: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda. - 107 -

Figura 3- 29: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda. - 108 -

Figura 3- 30: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda. - 109 -

Figura 3- 31: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona suburbana con una anchura de haz de 60°..... - 110 -

Figura 3- 32: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona suburbana con una anchura de haz de 90°..... - 110 -

Figura 3- 33: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona suburbana con una anchura de haz de 120°..... - 111 -

Figura 3- 34: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda. - 113 -

Figura 3- 35: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda. - 114 -

Figura 3- 36: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda. - 115 -

Figura 3- 37: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda. - 116 -

Figura 3- 38: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda. - 117 -

Figura 3- 39: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda. - 118 -

Figura 3- 40: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda. - 119 -

Figura 3- 41: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda. - 120 -

Figura 3- 42: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.	- 121 -
Figura 3- 43: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.	- 122 -
Figura 3- 44: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.	- 123 -
Figura 3- 45: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.	- 124 -
Figura 3- 46: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona rural con una anchura de haz de 60°.	- 125 -
Figura 3- 47: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona rural con una anchura de haz de 90°.	- 125 -
Figura 3- 48: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona rural con una anchura de haz de 120°.	- 126 -
Figura 3- 49: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.	- 128 -
Figura 3- 50: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.	- 128 -
Figura 3- 51: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.	- 129 -
Figura 3- 52: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona urbana con una anchura de haz de 60°.	- 129 -
Figura 3- 53: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona urbana con una anchura de haz de 90°.	- 130 -
Figura 3- 54: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona urbana con una anchura de haz de 120°.	- 130 -
Figura 3- 55: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.	- 131 -
Figura 3- 56: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.	- 131 -
Figura 3- 57: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.	- 132 -
Figura 3- 58: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona suburbana con una anchura de haz de 60°.	- 132 -

Figura 3- 59: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona suburbana con una anchura de haz de 90°.....	- 133 -
Figura 3- 60: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona suburbana con una anchura de haz de 120°.....	- 133 -
Figura 3- 61: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.....	- 134 -
Figura 3- 62: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.....	- 134 -
Figura 3- 63: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda	- 135 -
Figura 3- 64: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona rural con una anchura de haz de 60°.....	- 135 -
Figura 3- 65: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona rural con una anchura de haz de 90°.....	- 136 -
Figura 3- 66: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona rural con una anchura de haz de 120°.....	- 136 -
Figura 3- 67: Gráficas de SINR para sistemas receptores con la estación base de altura 40 metros y anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda en una zona urbana.....	- 138 -
Figura 3- 68: Gráficas de SINR para sistemas receptores con la estación base de altura 40 metros y anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda en una zona suburbana.....	- 139 -
Figura 3- 69: Gráficas de SINR para sistemas receptores con la estación base de altura 40 metros y anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda en una zona rural.....	- 140 -
Figura 3- 70: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios en una zona urbana con altura de la estación base de 40 m y anchura de haz de 120°	- 141 -
Figura 3- 71: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios en una zona suburbana con altura de la estación base de 40 m y anchura de haz de 120°.....	- 141 -
Figura 3- 72: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios en una zona rural con altura de la estación base de 40 m y anchura de haz de 120°.....	- 142 -
Figura 4- 1: Mapa con la ubicación de las ciudades elegidas para la aplicación de WiMAX.....	- 146 -
Figura 4- 2: Imagen panorámica de la ciudad de Madrid.....	- 149 -
Figura 4- 3: Relación entre el número de celdas por superficie y el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Madrid.....	- 150 -

Figura 4- 4: Relación entre el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario móvil para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Madrid.	- 151 -
Figura 4- 5: Norte de Bagdad junto al río Tigris.	- 152 -
Figura 4- 6: Relación entre el número de celdas por superficie y el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Bagdad.....	- 153 -
Figura 4- 7: Relación entre el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario móvil para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Bagdad.....	- 154 -
Figura 4- 8: Vista panorámica de la ciudad de Barcelona.	- 155 -
Figura 4- 9: Relación entre el número de celdas por superficie y el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Barcelona.	- 156 -
Figura 4- 10: Relación entre el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario móvil para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Barcelona.	- 157 -
Figura 4- 11: Ciudad de Mosul atravesada por el río Tigris.....	- 158 -
Figura 4- 12: Relación entre el número de celdas por superficie y el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Mosul.....	- 159 -
Figura 4- 13: Relación entre el número de celdas por superficie y el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario móvil para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Mosul.....	- 160 -
Figura A- 1: Escenario de simulación para la extensión del modelo de propagación para alturas de antena receptor superiores a 10 metros.	- 175 -
Figura A- 2: Modelo para el cálculo de las pérdidas de propagación en función de la altura de la antena receptora.....	- 176 -
Figura A- 3: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 10 metros en una zona urbana.	- 178 -
Figura A- 4: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 13 metros en una zona urbana.	- 178 -
Figura A- 5: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 16 metros en una zona urbana.	- 179 -
Figura A- 6: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 19 metros en una zona urbana.	- 179 -
Figura A- 7: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 22 metros en una zona urbana.	- 180 -

Figura A- 8: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 25 metros en una zona urbana.	- 180 -
Figura A- 9: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 28 metros en una zona urbana.	- 181 -
Figura A- 10: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 31 metros en una zona urbana.	- 181 -
Figura A- 11: Comparativa de la tasa binaria media dependiendo de los valores de altura de antena receptora considerados.	- 182 -
Figura A- 12: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 13 metros en una zona urbana.	- 183 -
Figura A- 13: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 16 metros en una zona urbana.	- 183 -
Figura A- 14: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 19 metros en una zona urbana.	- 184 -
Figura A- 15: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 22 metros en una zona urbana.	- 184 -
Figura A- 16: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 25 metros en una zona urbana.	- 185 -
Figura A- 17: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 28 metros en una zona urbana.	- 185 -
Figura A- 18: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 31 metros en una zona urbana.	- 186 -
Figura B- 1: Ejemplos de arquitecturas WiMAX Mobile con diferentes tipos de estaciones suscriptoras.	- 188 -
Figura B- 2: Estación Base SC-100e de RedMAX 4C.	- 189 -
Figura B- 3: Antena 35 SD98120NV de Stella Doradus.	- 191 -
Figura B- 4: Estación suscriptora SU-I (<i>indoor</i>), vista de frente y montada sobre un cristal.	- 192 -
Figura B- 5: RedMAX 4CTM Express (REX).	- 193 -
Figura B- 6: Ventajas de una estación base WiMAX con 3 dB más de sensibilidad de recepción.	- 194 -
Figura B- 7: Estación base Mobile WiMAX NTF-291 de Japan Radio Company (JRC).	- 196 -
Figura B- 8: Estación base BroadOne WX300 de Fujitsu.	- 196 -
Figura B- 9: Punto de acceso ExcelMAX de Winncom Technologies.	- 197 -

Figura B- 10: Antena de la estación base WiMax con ganancia de 16 dBi de Laird Technologies..... - 197 -

Figura B- 11: Estación base WiMAX de Nokia Flexi..... - 197 -

Figura B- 12: Estación base de Mobile Wimax de NaturalTeck..... - 198 -

Figura B- 13: Estación base WiMAX de Alcatel-Lucent en un entorno real..... - 198 -

Figura B- 14: Estación base de WiNETWORKS en una convención de tecnologías inalámbricas de banda ancha..... - 198 -

Figura B- 15: Módems USB WiMAX móvil..... - 199 -

Figura B- 16: Tarjeta WiMAX para la conexión inalámbrica del portátil de Samsung..... - 199 -

Figura B- 17: Equipo suscriptor del cliente de Samsung..... - 200 -

Figura B- 18: WiMAX USB dongles..... - 200 -

Índice de Tablas.

Tabla 2- 1: Comparación entre los estándares Fixed WiMAX, Mobile WiMAX, HSPA, 1x EV-DO y Wi-Fi.....	- 33 -
Tabla 2- 2: Especificaciones de estándares IEEE 802.16.....	- 38 -
Tabla 2- 3: Modalidades de la capa física en IEEE 802.16.....	- 43 -
Tabla 2- 4: Anchos de banda definidos y frecuencias de operación posibles en WiMAX.....	- 43 -
Tabla 2- 5: Modulaciones y valores de codificación posibles en WiMAX.....	- 48 -
Tabla 2- 6: Capacidad de la subportadora y valor de SINR mínimo para cada valor de FEC dependiendo de la modulación.....	- 48 -
Tabla 2- 7: Características principales de IEEE 802.16m.....	- 65 -
Tabla 2- 8: Valores de throughput del IEEE 802.16m.....	- 66 -
Tabla 2- 9: Requisitos del estándar global IMT-Advanced de la ITU y de WiMAX 802.16m.	- 68 -
Tabla 2- 10: Aplicaciones de WiMAX.....	- 73 -
Tabla 3- 1: Escenarios de Aplicación del Modelo de Propagación Erceg.....	- 77 -
Tabla 3- 2: Relación Señal a Ruido e Interferencias (SINR) para diferentes sistemas WiMAX...	- 79 -
Tabla 3- 3: Ganancia máxima de transmisión dependiendo de la anchura de haz de la antena. ..	- 81 -
Tabla 3- 4: Comparación del radio máximo de trabajo de la celda para los diferentes escenarios WiMAX.....	- 143 -
Tabla 4- 1: Datos de la ciudad de Madrid para el cálculo del número de celdas necesarias.....	- 149 -
Tabla 4- 2: Datos de la ciudad de Bagdad para el cálculo del número de celdas necesarias.....	- 152 -
Tabla 4- 3: Datos de la ciudad de Barcelona para el cálculo del número de celdas necesarias...	- 155 -
Tabla 4- 4: Datos de la ciudad de Mosul para el cálculo del número de celdas necesarias.....	- 158 -
Tabla 4- 5: Sumario de los resultados obtenidos para la aplicación WiMAX <i>indoor</i> en las ciudades elegidas.	- 161 -
Tabla 4- 6: Sumario de los resultados obtenidos para la aplicación WiMAX móvil en las ciudades....	- 162 -
Tabla 4- 7: Resultados para la aplicación WiMAX fijo outdoor en varias ciudades.	- 163 -

Tabla A- 1: Valores del exponente de propagación para el modelo de Erceg..... - 177 -

Tabla B- 1: Especificaciones de SC-100e Base Station, RedMAX. - 190 -

Tabla B- 2: Características WiMAX de la estación base SC-100e..... - 190 -

Tabla B- 3: Especificaciones eléctricas de la antena de la estación base..... - 191 -

Tabla B- 4: Especificaciones de Subscriber Unit *Indoor* (SU-I). - 193 -

Tabla B- 5: Características de la tarjeta Express para WiMAX Mobile. - 194 -

Tabla B- 6: Coste aproximado de las estaciones base necesarias en el despliegue de la aplicación WiMAX portátil indoor en distintas ciudades. - 195 -

Capítulo 1

Introducción.

1.1. Motivación.

Desde hace más de una década todas las redes de telecomunicaciones han evolucionado hacia la integración de toda clase de servicios en una única red global de telecomunicaciones. El desarrollo de esta red debe ir acorde a los tiempos actuales, siendo capaz de procesar cualquier tipo de información: voz, video, datos..., además de tener la capacidad de transferir grandes cantidades de información en un corto periodo de tiempo, así como satisfacer las necesidades de movilidad que hoy en día se demandan.

El creciente interés que despierta WiMAX entre los distintos agentes involucrados en el mundo de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) está cimentado en las ventajas competitivas, tanto de carácter económico como de prestaciones, que presenta esta tecnología de acceso radio frente a otras alternativas actualmente implantadas. Entre estos beneficios mencionados se encuentran, entre otros, la versatilidad, el ancho de banda proporcionado en comparación con otras tecnologías de acceso (WiFi, xDSL, etc.), y la alternativa efectiva en costes para el acceso a servicios de banda ancha.

WiMAX es un estándar de comunicación radio de última generación, promovido por el IEEE⁹ y especialmente diseñado para proveer accesos vía radio de alta capacidad a distancias inferiores a 50 kilómetros y con tasas de transmisión de hasta 70 Mbps. Las soluciones WiMAX se pueden aplicar en multitud de escenarios (enlaces punto a punto, redes metropolitanas, cobertura de *hot-spots*¹⁰ WiFi, redes empresariales, backbones¹¹, etc...) con altas garantías de disponibilidad y estabilidad.

La posibilidad de ofertar a los clientes altas tasas de descarga con un bajo coste de inversión, aumentará la competencia entre operadoras de telefonía que ofrecerán a sus clientes grandes aplicaciones multimedia, nuevos terminales y servicios avanzados como pueden ser la realización de operaciones bancarias desde nuestro móvil, a un precio reducido.

⁹ IEEE corresponde a las siglas de Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos, una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización, entre otras cosas. Es la mayor asociación internacional sin fines de lucro formada por profesionales de las nuevas tecnologías.

¹⁰ Un hotspot es una zona de cobertura Wi-Fi, en el que un punto de acceso o varios proveen servicios de red a través de un Proveedor de Servicios de Internet Inalámbrico. Los hotspots se encuentran en lugares públicos, como aeropuertos, bibliotecas, centros de convenciones, cafeterías, hoteles... Este servicio permite mantenerse conectado a Internet y puede brindarse de manera gratuita o pagando una suma que depende del proveedor.

¹¹ El término *backbone* se refiere al cableado troncal o subsistema vertical en una instalación de red de área local que sigue la normativa de cableado estructurado.

1.2. *Objetivos.*

El objetivo que se pretende alcanzar con este proyecto se centra en realizar un examen exhaustivo de la tecnología WiMAX móvil en varios escenarios de propagación, urbano, suburbano y rural para dos clases diferentes de usuarios de WiMAX: usuarios *indoor* (portátiles) y usuarios móviles. Se pretende analizar esta tecnología para la banda de 3.5 GHz, estudiando la relación señal a ruido e interferencias, SNIR, que se obtiene al realizar las simulaciones correspondientes de un sistema WiMAX dado, variando en todos los casos elementos importantes como las alturas de las estaciones transmisora y receptora, la ganancia de la antena de la estación base, el ancho de haz de las antenas... analizando el rango de cobertura que abarcan estos sistemas con interferencias cocanales. Se proporcionarán resultados sobre la SINR de la tecnología con múltiples interferencias cocanales en clústeres de siete celdas. A su vez, se aportarán los valores de la tasa binaria de descarga obtenida por sector, correspondiente a diferentes valores del radio de cada celda. En dependencia de los resultados se propondrá una solución para ofrecer cobertura a diferentes ciudades ubicadas en diferentes regiones del planeta proporcionando la cantidad de celdas necesarias para la aplicación de WiMAX.

Nuestro análisis no sólo dependerá de la variación de la ganancia de la antena transmisora ni de la variación de la altura de las estaciones, sino que es importante destacar la variación de los ángulos de transmisión de las antenas (ancho de haz), los diferentes anchos de banda del canal utilizados y las pérdidas de propagación serán datos que también varíen nuestros resultados. Otra modificación destacable en los resultados será los obstáculos que atraviesen la señal y las interferencias ya que los valores obtenidos serán diferentes dependiendo de si tiene que traspasar una fachada de un edificio o solo una ventana del mismo. Por último, mencionar la pluralidad de resultados que obtendremos según el tipo de usuario que acceda a WiMAX: portátil ó móvil.

En este proyecto pretendemos estudiar, para cada uno de los entornos de propagación, todos los factores que influyen en el sistema y en la propagación de la señal con el fin de conocer las limitaciones y capacidades del sistema, las condiciones óptimas que permiten obtener las mejores velocidades de descarga, así como la obtención de las tasas binarias de descarga que se conseguirían en una situación real.

Para poder lograr nuestros objetivos, el examen de cada sistema de propagación se dividirá en varias partes. En primer lugar analizaremos como afecta la variación de los parámetros de la comunicación en la relación señal a ruido e interferencias recibida; de este modo podemos deducir los resultados que se obtendrán cuando se decida modificar los parámetros del sistema. En segundo lugar, examinaremos como han influido esas modificaciones en el perfil de SNIR recibido sobre los órdenes de modulación de la comunicación. Para poder emplear en la comunicación un orden de modulación determinado, es necesario que se cumplan unas condiciones mínimas de calidad de señal en el terminal de recepción. Si los cambios producidos en el perfil de SNIR con la variación de los parámetros del sistema, no son suficientes para producir un cambio en los órdenes de modulación de la comunicación, la tasa binaria con la que descarguemos no cambiará. De este modo, pretendemos analizar si los cambios provocados en la SNIR, serán suficientes para producir variaciones en la tasa binaria de descarga.

1.3. Organización de la memoria.

El informe del trabajo se divide en cinco capítulos. El primer capítulo, en el que nos encontramos inmersos, es una introducción al presente proyecto fin de carrera. El capítulo dos es una introducción a los fundamentos de la tecnología WiMAX Mobile, para comprender el funcionamiento de esta tecnología y sus funcionalidades prácticas que han motivado su desarrollo. En el tercer capítulo se explican ciertos procedimientos que se van a manejar durante el resto del proyecto, como el cálculo de la SINR y las pérdidas de propagación para cada uno de los sistemas a utilizar y se exponen los resultados de las simulaciones realizadas para la banda de 3.5 GHz utilizando un clúster de siete celdas, mostrando en cada caso las gráficas correspondientes a la SINR y los gráficos del comportamiento de la tasa binaria neta media para diferentes valores de radio, que aportan veracidad al proyecto y una mejor comprensión de los resultados. En el capítulo 4 se exhibirán las soluciones para ofrecer cobertura en diferentes ciudades, que difieren entre sí por su localización y sus características demográficas. El capítulo 5 aporta las conclusiones generales del proyecto, que muestra un análisis de los resultados tratados. Finalmente, existen los apartados de referencias y bibliografía utilizada en la documentación del proyecto, el glosario con el significado de todos los acrónimos empleados, los anexos con la información añadida, el presupuesto y el pliego de condiciones.

Capítulo 2

Descripción de WiMAX *Mobile*.

2.1. Introducción a la Banda Ancha Móvil.

La banda ancha inalámbrica es considerada como uno de los temas más relevantes en la industria de las telecomunicaciones en los últimos años. Tanto la tecnología inalámbrica, como los accesos cableados de banda ancha, vienen gozando de una gran aceptación masiva por parte del mercado. El número de usuarios de Internet a nivel mundial creció de 361 millones de usuarios en el año 2000 a más de 1734 millones en el 2009¹², tal y como se puede comprobar en la Figura 2-1. Este asombroso crecimiento de Internet está siendo impulsado por la demanda de servicios de acceso de mayor velocidad, lo cual trae aparejado un crecimiento en paralelo en la elección de la tecnología de banda ancha.

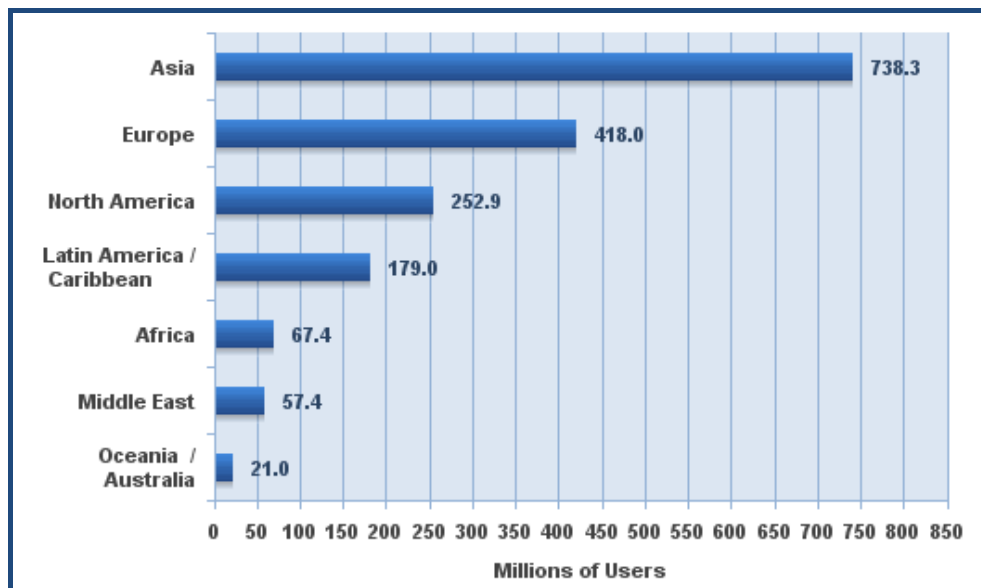


Figura 2-1: Usuarios de Internet en todo el mundo dividido por zonas geográficas.

Antes de abordar el tema de la banda ancha inalámbrica, revisemos brevemente el estado del acceso de banda ancha fija actual. Tanto la tecnología DSL¹³ (*Digital Subscriber Line*), la cual permite entregar ancho de banda sobre un par trenzado telefónico, como la de cable módem, la cual utiliza el cable coaxial de la red de la operadora de TV, son, hoy por hoy, las tecnologías predominantes en el mercado masivo del acceso de banda ancha. Ambas tecnologías proveen a cada usuario normalmente de unos pocos megabits por segundo, pero los continuos avances están haciendo posible entregar algunas decenas de Mb/s.

¹² Fuente: Internet World Stats. September 2009. <http://www.internetworldstats.com/stats.htm>

¹³ DSL (siglas de Digital Subscriber Line, "línea de suscripción digital") es un término utilizado para referirse de forma global a todas las tecnologías que proveen una conexión digital sobre línea de abonado de la red telefónica básica o conmutada: ADSL, ADSL2, ADSL2+, SDSL, IDSL, HDSL, SHDSL, VDSL y VDSL2. Tienen en común que utilizan el par trenzado de hilos de cobre convencionales de las líneas telefónicas para la transmisión de datos a gran velocidad.

Sólo desde finales de los 90 se hizo común el despliegue de las redes de banda ancha por parte de las operadoras de telecomunicaciones. El número de abonados de banda ancha ha crecido muy significativamente con el paso del tiempo, desde 100 millones a finales del año 2003 a 467 millones a finales del año 2009¹⁴. La tendencia actual es tener conexión de banda ancha en cualquier sitio y a cualquier hora por lo que el número de usuarios de banda ancha siempre se incrementa año tras año como se puede apreciar en la Figura 2-2.

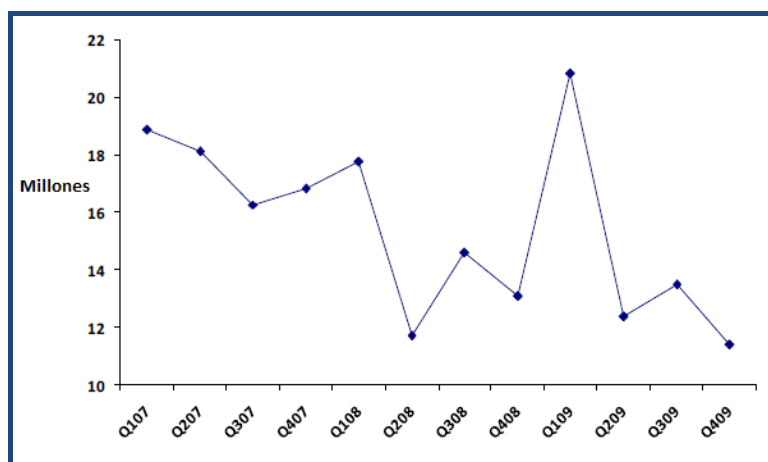


Figura 2- 2: Incremento neto del número mundial de abonados de banda ancha en el periodo temporal de Q1 2007 – Q4 2009.

Hasta el año 2000, los usuarios de Internet accedían a su contenido a través de la infraestructura de red cableada. No obstante, la tecnología ha evolucionado de tal forma que en la actualidad un gran número de usuarios acceden a la red de forma inalámbrica. La historia de la tecnología inalámbrica (*wireless*) se caracteriza por notables avances en un corto periodo de tiempo. La evolución de las redes de acceso inalámbricas se encuentra inmersa en una nueva etapa conocida como “**Cuarta Generación (4G)**”.

Las tecnologías de acceso inalámbricas han evolucionado de distintas maneras pero todas ellas tienen un objetivo común: **obtener el mejor funcionamiento y la mayor eficiencia en entornos con alta movilidad del usuario**. La primera generación (1G) cubrió los aspectos básicos de la voz móvil mientras la segunda generación (2G) introdujo mayor capacidad y cobertura. Después surgió la tercera generación (3G) que ha proporcionado mayores velocidades al usuario abriendo las puertas de la verdadera experiencia de **banda ancha móvil**. La evolución de las comunicaciones móviles se ha producido en “generaciones” identificadas por cambios rupturistas en la tecnología. En la Figura 2-3 se describen dichas generaciones con una breve síntesis de la variación introducida.

¹⁴ Fuente: Dato del número de abonados de banda ancha obtenido del Informe World Broadband Statistics for Q4 2009, Marzo 2010. Global broadband statistics, Point Topic. <http://www.point-topic.com>

- **0G (sistema automático de comunicaciones móviles, año 1956)**
- **1G (AMPS, NMT, TACS):** analógico, poca capacidad, pensada para ofrecer sólo voz, poco eficiente en consumo de potencia.
- **2G (CDMA, TDMA, GSM, PDC):** digital, incorpora servicios como envío/recepción de mensajes cortos y transmisión de datos en modo circuito (WAP).
- **2,5G (IS-95B, GPRS, EDGE):** incorpora la técnica de conmutación de paquetes, que incrementa las velocidades teóricas de transmisión de datos.
- **3G (CDMA2000, UMTS):** aumenta considerablemente las velocidades de transmisión de datos, haciendo uso también de conmutación de paquetes.
- **3,5G (HSPA, EVDO):** mejoran la eficiencia y la capacidad e incrementan las velocidades teóricas de transmisión de datos.
- **4G (UMB, LTE&SAE, WiMAX):** mayor flexibilidad y eficiencia espectral: capacidad para operar con diferentes anchos de banda y 3 a 4 veces más eficiente que HSPA

Figura 2- 3: Evolución de las generaciones en comunicaciones móviles.

No es fácil definir el término **banda ancha móvil** así como las implicaciones que conlleva. Con el término **banda ancha** nos referimos, de forma sencilla, a una conexión a Internet que soporta servicios de voz, datos y vídeo a velocidades altas. Por otro lado, se considera “ancha” porque pueden darse múltiples tipos de servicios para un mismo ancho de banda y **móvil** porque permite conectarse y disfrutar de este servicio a través de dispositivos móviles.

La **banda ancha inalámbrica** surge de la necesidad de contar con una alternativa competitiva a la tradicional banda ancha cableada. Estimulado por la desregularización de la industria de las telecomunicaciones en gran parte del mundo, así como también el rápido crecimiento de Internet, muchos operadores encontraron en la solución inalámbrica un medio para expandir el mercado y ganar ventaja sobre otros competidores.

2.2. Evolución de la Banda Ancha Móvil.

En el transcurso de la última década, se desarrollaron algunos sistemas de acceso inalámbricos, principalmente debido a que muchas empresas consideraban atractiva la posibilidad de desplegar nuevas redes a un relativo bajo costo. Estos sistemas se diferenciaban básicamente por sus capacidades, protocolos, utilización del espectro, aplicaciones que pueden soportar y otros parámetros. Algunos sistemas lograron ser implementados exitosamente pero normalmente estuvieron limitados a unos pocos mercados. Estos sistemas inalámbricos, no habían logrado trascender en forma popular debido a la fragmentación de la industria a la hora de adoptar un estándar en común.

Los recientes avances que han tenido las comunicaciones móviles en la última década han redefinido el modo de vida actual. Esencialmente los avances en transmisión por radio han permitido la generación de nuevos servicios bajo el dominio de las redes inalámbricas, que se han convertido en una tecnología única al alcance de muchas personas en el mundo. A lo largo del tiempo los sistemas de banda ancha inalámbrica han estado limitados por las empresas privadas que lo instalaban, siendo en algunos casos demasiado costosa su implementación de manera masiva. **WiMAX**, del inglés *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, busca brindar servicios de transmisión de datos de forma inalámbrica a cualquier tipo de dispositivo.

En la actualidad, se puede observar que las distintas tecnologías de **banda ancha móvil** existentes comparten similitudes en la arquitectura de red, es decir, una red basada en IP¹⁵, y también en la interfaz radio, con acceso por división múltiple de frecuencias ortogonales OFDMA. Sin embargo, las redes móviles existentes no son completamente convergentes aunque se diseñen para proveer la ubicuidad de variados servicios multimedia a través de la interconexión de las redes.

El acceso de **banda ancha inalámbrica** (*Broadband Wireless Access*) experimenta una gran demanda por parte de los usuarios lo que conduce a la necesidad de conseguir nuevas tecnologías inalámbricas para reducir el coste. Uno de los principales obstáculos para permitir acelerar el despliegue de sistemas de acceso inalámbricos para entornos extensos es el coste de despliegue de la solución. Aunque en el coste total de las instalaciones influyen varios factores (licencias, espacio para torretas, red troncal, etc...), el factor decisivo es el coste de los equipos.

La armonización global o la disponibilidad uniforme de espectro en todo el mundo es crucial para reducir el coste del equipamiento, ya que la interfaz radio es un componente importante en el coste total de los sistemas. Para maximizar el rendimiento del sistema radio y minimizar su coste, la utilización del espectro de radiofrecuencias debe ser optimizada para las bandas de frecuencia identificadas como óptimas para su utilización con WiMAX. A un número menor de radiofrecuencias necesarias para cubrir todo el planeta, es posible conseguir una mejor economía de escala, resultando un menor coste del equipamiento y total del proyecto.

El acceso de banda ancha no solo posibilita navegar en la web y descargar archivos más rápidamente, sino que le abre paso a muchas aplicaciones multimedia, tales como el streaming¹⁶ de audio y video en tiempo real, conferencia multimedia y juegos interactivos. Las conexiones de banda ancha también están siendo utilizadas para telefonía a través de tecnología voz sobre IP (conocido como VoIP). Los sistemas de acceso de banda ancha más avanzados, tal como la fibra hasta el hogar (FTTH) ó el bucle de abonado digital de alta velocidad (*Very high data rate digital subscriber line* o VDSL), permiten además aplicaciones tales como videos de alta calidad, incluyendo Televisión de alta definición (HDTV) y video bajo demanda (VoD).

¹⁵ La familia de protocolos de Internet es un conjunto de protocolos de red en los que se basa Internet y que permiten la transmisión de datos entre redes de computadoras. En ocasiones se le denomina conjunto de protocolos TCP/IP, en referencia a los dos protocolos más importantes que la componen: Protocolo de Control de Transmisión (TCP) y Protocolo de Internet (IP), que fueron los dos primeros en definirse, y que son los más utilizados de la familia.

¹⁶ Streaming es un término que se refiere a ver u oír un archivo directamente en una página web sin necesidad de descargarlo antes al ordenador o computador. En términos más complejos podría decirse que describe una estrategia sobre demanda para la distribución de contenido multimedia a través del internet. Un claro ejemplo de esto es el caso de youtube.

La primera tecnología de banda ancha móvil basada en IP y OFDMA fue **WiMAX** (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), desarrollada por el **WiMAX Forum** e **IEEE** (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Después le siguieron otras tecnologías como LTE (*Long Term Evolution*), cuya responsabilidad es del grupo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) y UMB (*Ultra Mobile Broadband*), desarrollado por 3GPP2 (*Third Generation Partnership Project 2*).



Figura 2- 4: Logos de las organizaciones responsables de los estándares WiMAX, LTE y UMB, respectivamente.

Las tres tecnologías mencionadas están llamadas a formar parte de la cuarta generación, entre ellas tiene puntos en común pero también características propias. En la Figura 2-5 se mencionan las principales especificaciones de las tres tecnologías definidas anteriormente a modo de comparación.

TECNOLOGÍA	DESARROLLADO POR	BASEADO EN	ENLACES	ANCHO DE BANDA	TASA DE DATOS
LTE	3GPP	GSM	DL: OFDMA UL: Única portadora FDMA	1,25 a 20 MHz	250 Mb/s
UMB	3GPP2	CDMA	OFDMA	1,25 a 20 MHz	Downstream: 288 Mb/s Upstream: 75 Mb/s
WiMAX	WiMAX Forum e IEEE	802.16	OFDMA	1,25 a 20 MHz	Móvil: 100 Mb/s Fijo: 1 Gb/s

Figura 2- 5: Principales características de los estándares WiMAX, LTE y UMB.

Los dos organismos oficiales responsables del estándar WiMAX, **WiMAX Forum** e **IEEE**, pidieron a la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (ITU) que éste estándar fuera incluido en la especificación **IMT2000**¹⁷ (*International Mobile Telecommunications 2000*) y fue aprobada la petición en octubre del 2007.

¹⁷ Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT-2000) es el estándar global para la tercera generación de redes de comunicaciones inalámbricas 3G, definidas por un sistema de estándares de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU). IMT-2000 proporciona un marco para el acceso inalámbrico mundial uniendo los diversos sistemas de redes terrestres y satelitales.

IMT2000 soporta hasta siete tecnologías diferentes de acceso incluyendo OFDMA (WiMAX), FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), TDMA (*Time Division Multiple Access*) y CDMA (*Code Division Multiple Access*). Esta variedad coloca a la tecnología OFDMA en una competición mundial junto con otras recientes mejoras de la tecnología de 3G. Como se puede observar en la Figura 2-6, los operadores de servicios de valor añadido de banda ancha móvil han recorrido un camino de migración de tecnologías desde TDMA en GSM, WCDMA en UMTS a finalmente la tecnología predominante OFDMA.

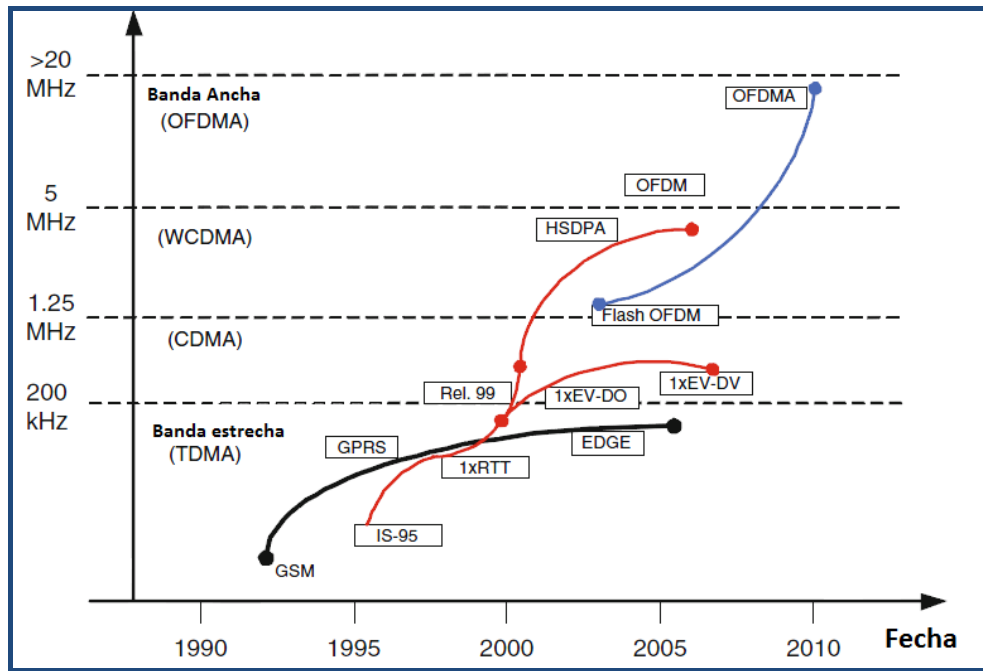


Figura 2- 6: Evolución de las tecnologías de banda ancha móvil.

2.2.1. WiMAX y otras tecnologías de banda ancha móvil.

WiMAX, como hemos podido apreciar, no es la única solución para distribuir servicios de banda ancha inalámbrica. Actualmente existen muchas soluciones propietarias para aplicaciones fijas y móviles, las cuales ya están disponibles en el mercado. Aparte de estas soluciones propietarias, existen soluciones alternativas basadas también en estándares, que se solapan parcialmente con WiMAX.

A continuación realizaremos una breve síntesis de WiMAX y de las alternativas que consideramos más importantes para finalmente concluir con las ventajas/desventajas de WiMAX sobre el resto de tecnologías.

2.2.1.1. Acceso inalámbrico de banda ancha: inicio de WiMAX.

El acceso inalámbrico de banda ancha comenzó intentando ser una alternativa competente a las soluciones de banda ancha fija ya existente: xDSL¹⁸, cable modem... Sin embargo, debido al rápido crecimiento de la banda ancha sin cables, ha surgido la necesidad de nuevas tecnologías inalámbricas que reduzcan los costes y a su vez ayuden a suavizar el monopolio de los proveedores de servicios de banda ancha cableada.

Los sistemas de distribución punto-multipunto (LMDS) supusieron el primer sistema remarcable de acceso de banda ancha inalámbrico ya que se establecieron como una alternativa a los sistemas cableados (cobre y fibra) a finales de los años 90. Más tarde se desarrollaron los servicios de distribución multipunto y multicanal (MMDS) que proporcionaba mayor rango de cobertura pero ambos necesitaban línea de visión para operar correctamente.

El reto de conseguir comunicaciones sin necesidad de línea de visión directa (NLOS) comenzó en 1998 con el grupo de la IEEE 802.16 cuyo objetivo era estandarizar las tecnologías para redes de área metropolitana inalámbricas (Wireless MAN). En el año 2001, se consiguió el primer estándar sin necesidad de visión directa en la frecuencia de operación de 2 a 11 GHz, Wireless MAN-SC, con una única portadora. En 2003, se completó IEEE 802.16a que introdujo tres esquemas de acceso: única portadora (*Single carrier*, SC), OFDM y OFDMA. El estándar IEEE 802.16-2004 reemplazó a las versiones anteriores convirtiéndose en la solución para WiMAX fijo. En 2005, IEEE 802.16e-2005 imitó al del año anterior pero esta vez como solución para WiMAX móvil.

Entre las principales características técnicas de WiMAX se encuentran:

- Cobertura radial de 50 kilómetros, en promedio.
- Transmisión efectiva de 124 Mbps.
- Anchos de canal entre 1,5 y 20 MHz
- Utiliza modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division*), con 2048 señales portadoras, que permiten altas velocidades de transferencia.
- Incorpora soporte para la tecnología de antenas inteligentes (*smart antennas*), la cual mejoran la eficiencia espectral y la cobertura.
- Definida para las frecuencias de hasta 11 GHz para conexiones con y sin línea de visión, y entre 10 GHz y 66 GHz para conexiones con línea de visión.
- Incluye mecanismos de modulación adaptativa, mediante los cuales la estación base y el equipo de usuario se conectan utilizando la mejor de las modulaciones posibles, en función de las características del enlace radio.
- Topología punto-multipunto y de malla.
- Bandas licenciadas y de uso libre, dependiendo de la legislación de cada país.
- Aplicaciones para la transmisión de voz, video y datos.
- Excelente desempeño de transmisión, garantizado vía QoS (*Quality of Service*).

¹⁸ xDSL y DSL (siglas de Digital Subscriber Line, "línea de suscripción digital") es un término utilizado para referirse de forma global a todas las tecnologías que proveen una conexión digital sobre línea de abonado de la red telefónica básica o conmutada: ADSL, ADSL2, ADSL2+, SDSL, IDSL, HDSL, SHDSL, VDSL y VDSL2.

2.2.1.2. 3G: UMTS y HSPA.

3GPP y 3GPP2 han introducido las nuevas tecnologías de tercera generación (3G) como una evolución de la existente segunda generación. 3GPP es el organismo de estandarización de las tecnologías móviles, responsable de la estandarización de GSM y de UMTS y está actualmente en proceso la estandarización de LTE así como la evolución de los sistemas actuales. Una de las ventajas de las tecnologías móviles es su alto grado de estandarización lo que permite el uso de proveedores distintos en las infraestructuras permitiendo la competencia dentro de la red del operador.

3G es una abreviatura para la “tercera generación” de telefonía móvil. Los servicios asociados con 3G posibilitan la transferencia tanto de voz (una llamada telefónica), como de datos (como la descarga de programas, intercambio de correo electrónico y mensajería instantánea). Los estándares en 3G utilizan CDMA para compartir el espectro entre los usuarios. Aunque inicialmente se especificó una velocidad de 384 Kbit/s, la evolución de la tecnología permite ofrecer al suscriptor velocidades de descarga superiores a 3 Mbit/s.

El primer estándar de la tercera generación fue **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunications Systems*), basado en WCDMA y que fue publicado en el año 2000 como la evolución de **GSM**, **GPRS** (*General Packet Radio Service*) y **EDGE** (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) ofreciendo servicios mejorados de voz y datos con un ancho de banda de 5 MHz.

La tecnología UMTS es la primera tecnología de tercera generación, que surge en paralelo a otras tecnologías como la evolución del CDMA. Se diferencia de GSM en su mayor capacidad de cursar tráfico y su mayor velocidad para los datos permitiendo el comienzo del uso de los datos de forma significativa en los móviles. UMTS supuso el primer sistema de datos móviles a gran escala. Como evolución del GSM a nivel de estandarización (no a nivel tecnológico), supuso asimismo un primer sistema concebido desde un punto de vista totalmente global, lo cual de nuevo ha permitido un despliegue masivo mundial, aunque su adopción en cuanto a número de clientes es todavía limitada frente a sistemas GSM tradicionales.

El Release 5 de 3GPP, creado debido al rápido crecimiento de UMTS, introdujo **HSDPA** (*High Speed Downlink Packet Access*) que mejoró la eficiencia espectral para servicio de datos con mayores velocidades de descarga. En 2005, con el Release 6, surgió **HSUPA** (*High Speed Uplink Packet Access*) y receptores avanzados. La combinación de HSUPA y HSDPA se conoce como **HSPA** (*High Speed Packet Access*).

HSPA permite mayor capacidad en las redes y muchas mejores prestaciones tanto en la velocidad de datos (throughput) como en el tipo de servicios de datos que se pueden proveer, como por ejemplo voz sobre IP (VoIP). La primera modalidad implementada fue HSDPA que mejora exclusivamente el enlace descendente (de la red al usuario) permitiendo una mejora de velocidad de transmisión teórica de hasta 14,4 Mbps de pico.

El siguiente paso en la mejora del interfaz radio es HSUPA en el que se mejora el enlace ascendente y permite una mejora de velocidad de transmisión teórica de pico de hasta 5,76 Mbps.

En 2008, saliendo a la luz el Release 7, ocurrieron nuevos avances como **HSPA+**, el uso de mayores modulaciones como 64-QAM con soporte para MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). HSPA+ integra en la estación base un elemento de control RNC (*Radio Network Controller*) para

reducir la latencia y simplificar la arquitectura de red. De esta forma HSPA+ puede verse como el enlace que une la tecnología de 3G, HSPA, con la nueva tecnología de cuarta generación LTE.

Seguidamente y a modo de resumen gráfico, podemos ver en la Figura 2-7 la evolución de las tecnologías de tercera generación desarrolladas por el organismo 3GPP.

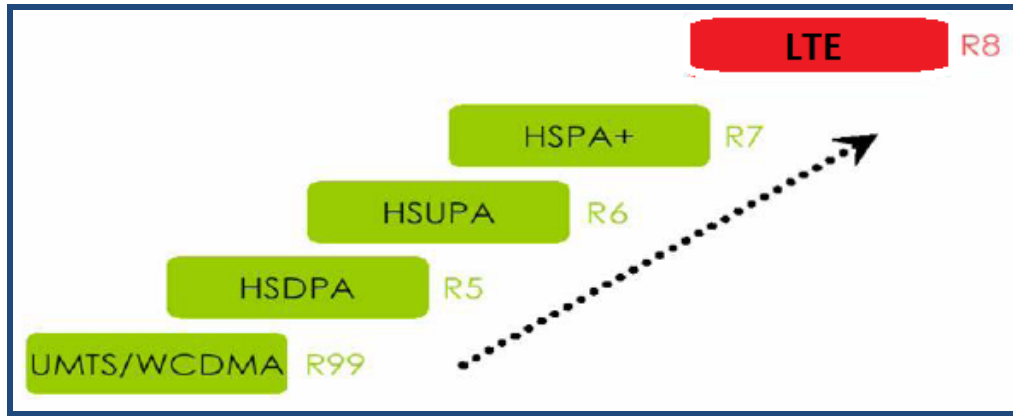


Figura 2- 7: Evolución de las tecnologías 3G y sus lanzamientos (releases [R]).

3GPP2 continuó la evolución de la tecnología con los sistemas basados en el estándar CDMA2000, 1x EV-DO (*Evolution-Data Optimized*) como solución 3G de los operadores de CDMA. Este primer estándar introduce una red de banda ancha centrada en datos con tasas por debajo de 2Mbps en entornos móviles. En las últimas revisiones de la tecnología, EV-DO Revisión C, se puede conseguir de 30 a 40 Mbps en el enlace ascendente y de 70 a 200 Mbps en el descendente, con un ancho de banda de 20 MHz. En China, y también gran parte de Asia, algunos operadores se enfocan en TD-SCDMA (*Time Division Synchronous CDMA*) como solución 3G.

2.2.1.3. Sistemas WiFi.

Las redes de área local inalámbricas (WLAN) proporcionan conectividad inalámbrica en un pequeño rango a usuarios fijos o con una movilidad muy reducida. WLAN, conocido comúnmente como WiFi, se basa en la familia de estándares IEEE 802.11 y es una tecnología principalmente pensada como una extensión de una red de acceso de área local (LAN), diseñada para brindar una cobertura *indoor*. El primer estándar, 802.11b, ofrecía tasas de 11 Mbps en un rango de 30 metros. Los sistemas actuales de WiFi, basados en IEEE 802.11a/g/n, soportan una tasa de transferencia máxima de 54 Mbps y normalmente la distancia de cobertura no supera los 100 metros. IEEE 802.11g soporta QoS y el estándar más reciente 802.11n introduce la posibilidad de utilizar MIMO con modulación OFDM. Podemos observar la Figura 2-8 para visualizar la evolución de los estándares IEEE 802.11 en comparación con IEEE 802.16.

WiFi se ha convertido en el estándar preferido a la hora de elegir una forma de conexión para “los últimos metros” (*last mille*) en casas, oficinas y lugares públicos, en lugar del tradicional cable de red. Sin embargo, la ineficiencia del protocolo CSMA¹⁹ usado por WiFi, junto con la interferencia existente en la banda no licenciada, son restricciones que reducen significativamente la capacidad de operar estos sistemas en escenarios “*outdoor*”. Además los sistemas WiFi no fueron diseñados para soportar la movilidad a alta velocidad.

Una ventaja significativa de WiFi sobre WiMAX y 3G es la gran disponibilidad, el bajo costo de los equipos y que la mayoría de las computadoras portátiles que se comercializan hoy en día, tienen ya incorporadas la interfaz Wi-Fi. También están siendo incorporados en otra clase de dispositivos como PDA’s (ej.: Palms, Blackberrys...), teléfonos móviles, cámaras, etc.; lo que hace que sea una tecnología cada vez más masiva.

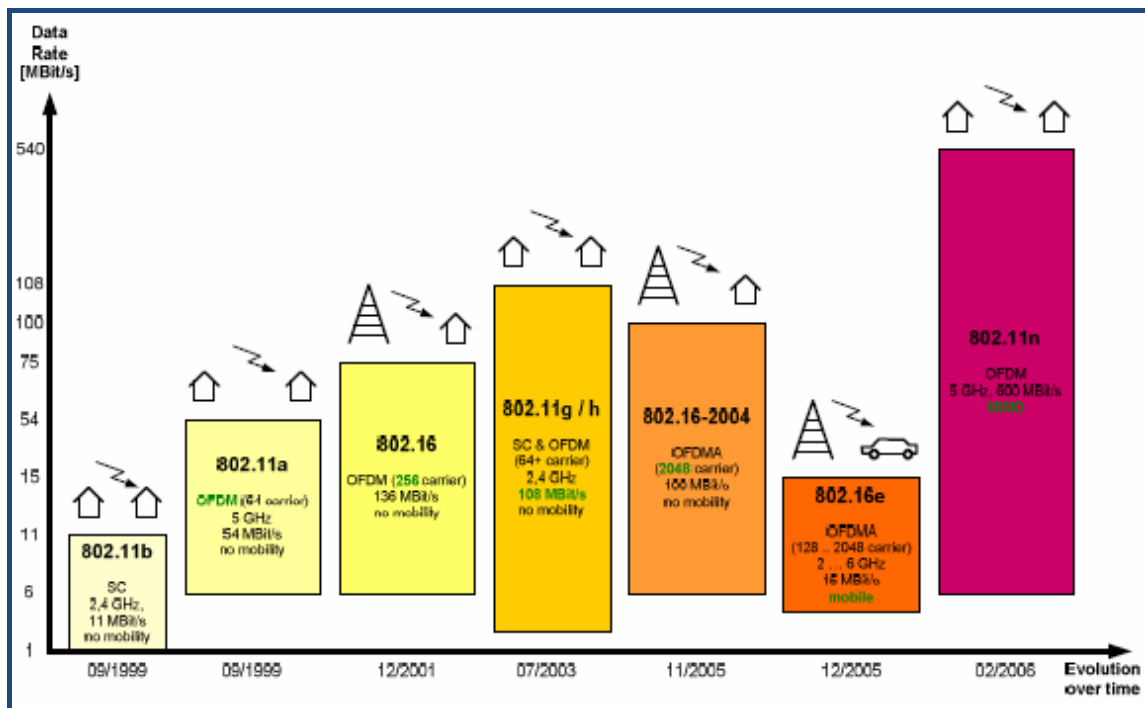


Figura 2- 8: Evolución y diferencias de los estándares de los grupos IEEE 802.11 y 802.16.

¹⁹ CSMA/CD, siglas que corresponden a Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (en español, "Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Detección de Colisiones"), es una técnica usada en redes Ethernet para mejorar sus prestaciones. En el método de acceso CSMA/CD, los dispositivos de red que tienen datos para transmitir funcionan en el modo "escuchar antes de transmitir". Esto significa que cuando un nodo desea enviar datos, primero debe determinar si los medios de red están ocupados o no.

2.2.1.4. 4G: LTE y WiMAX móvil.

En la actualidad, teniendo en cuenta los estándares mencionados en los anteriores apartados, el escenario de las diferentes tecnologías inalámbricas existentes atendiendo a la movilidad del usuario o a su tasa de descarga es el mostrado en la siguiente ilustración, Figura 2-9.

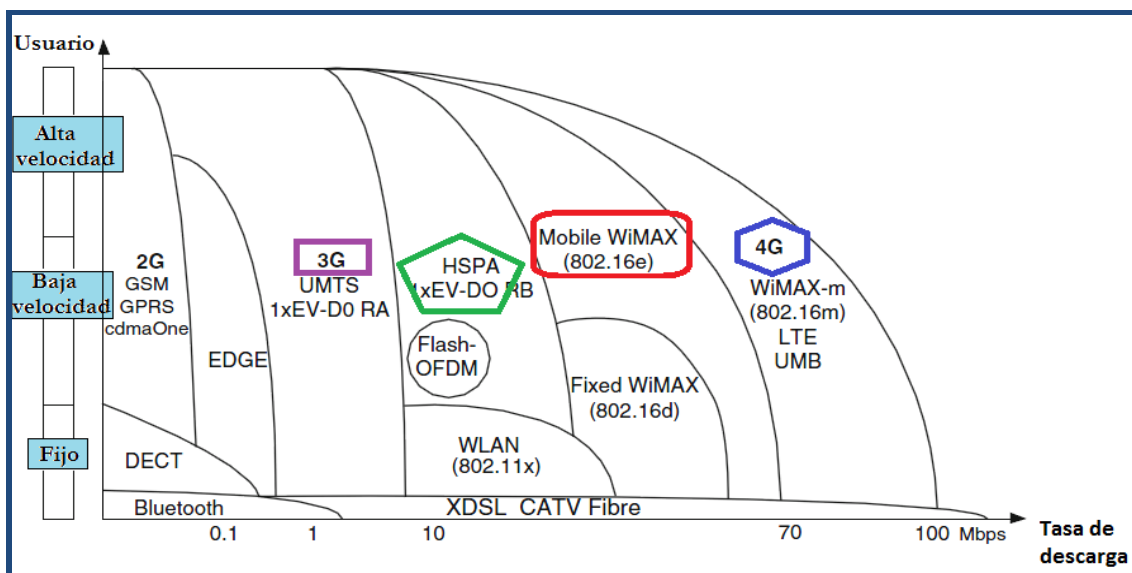


Figura 2- 9: Escenario de evolución de las tecnologías inalámbricas.

3GPP continúa desarrollando los protocolos para conseguir el estándar 4G, **LTE**, sucesor de UMTS y HSPA. El objetivo de *Long Term Evolution* es conseguir una tasa de transferencia máxima de 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el ascendente, con una eficiencia espectral media tres o cuatro veces superior al último lanzamiento de HSPA Release 6. Para conseguir estos valores tan altos de tasas, la interfaz radio se basa en OFDM/OFDMA y en técnicas avanzadas de antenas como MIMO, compartiendo así similitudes con WiMAX.

La nueva interfaz radio LTE estará basada en una técnica de multiplexación (acceso compartido al medio radioeléctrico por el cliente) de tipo OFDM (la misma que utiliza WiMAX) con mejoras en el rendimiento en el uso del espectro, velocidad (tasa binaria proporcionada) y latencia²⁰, simplificación de la red radio y soporte eficiente de servicios en modo paquete.

Los objetivos iniciales de la interfaz radio LTE son:

- Flexibilidad espectral: Capacidad para operar con diferentes anchos de banda (1,25 MHz, 2,5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz), tanto en espectro pareado (un bloque de espectro para el sentido descendente desde estación de base hacia el terminal, y otro bloque para el del sentido ascendente desde el terminal hacia la estación de base), como no pareado (ambos sentidos soportados sobre una misma o mismas frecuencias).

²⁰ Retardo que se tiene en una señal por efecto del procesamiento de la misma.

- Eficiencia espectral: del orden de 3 a 4 veces mejor que la del HSDPA en el enlace descendente, y entre 2 y 3 veces mejor que HSUPA en el ascendente. Traducido a velocidades (throughput), esto supone requisitos del orden de velocidades de pico y por usuario de unos 100 Mbps en un ancho de banda de 20 MHz en el sentido descendente, y de 50 Mbps en el ascendente.

WiMAX móvil evolucionó partiendo de un estándar de acceso inalámbrico fijo por lo que afronta el reto de soportar movilidad mientras que los estándares basados en CDMA, UMTS y HSPA, han cubierto originalmente los servicios de voz móviles por lo que deben conseguir altas velocidades. La capacidad de transferencia en WiMAX depende del ancho de banda del canal que se esté usando. A diferencia de los sistemas 3G, los cuales poseen un canal de ancho de banda fijo, WiMAX define un canal donde se puede seleccionar el ancho de banda, entre 1.25 MHz y 20 MHz, lo cual permite desarrollos muy flexibles.

WiMAX móvil provee mayores tasas binarias con OFDMA que los otros estándares. Además, introduce varias características necesarias para soportar movilidad y proporcionar calidad de servicio (QoS) comunes con HSPA: modulación y codificación adaptativa, ARQ Híbrida (H-ARQ), planificación rápida y traspaso de ancho de banda eficiente. La principal diferencia se encuentra en el tipo de transmisión bidireccional: WiMAX móvil usa TDD (División por transmisión bidireccional en el tiempo) mientras que HSPA usa FDD (División por transmisión bidireccional en frecuencia).

WiMAX móvil tiene la ventaja de tolerar mejor la co-interferencia y la interferencia debida al multitrayecto. A su vez la eficiencia espectral máxima es de 1.9 bps/Hz frente a 0.9 de HSPA, por lo que WiMAX requiere menos estaciones base para conseguir la misma densidad de datos.

La capa física OFDM, usada por WiMAX, es más amigable para soportar MIMO que los sistemas CDMA desde el punto de vista de la complejidad requerida para una misma ganancia. OFDM también hace más fácil la explotación de conceptos tales como la diversidad de frecuencia y la diversidad multiusuario, a fin de mejorar aun más la capacidad del sistema. Por lo tanto, cuando lo comparamos con 3G, WiMAX ofrece picos en las tasas de transferencia más altos, gran flexibilidad, tasas de transferencias promedio mayores y mejor eficiencia espectral.

Otra ventaja de WiMAX es la capacidad de soportar más eficientemente enlaces simétricos y soporta ajustes flexibles y dinámicos en cuanto a la relación de las velocidades de subida y bajada. Típicamente los sistemas 3G poseen una relación en los enlaces de subida-bajada fija y asimétrica.

La capa de acceso al medio de WiMAX (Capa MAC), fue desarrollada para soportar una gran variedad de mezclas de tráfico, incluyendo: una velocidad de transferencia (*bit rate*) constante para tiempo-real o no real, una velocidad de tráfico, datos prioritarios, y datos del tipo *Best Effort*²¹. Soluciones 3G tales como HSDPA y 1xEV-DO fueron también diseñadas para una variedad de niveles de calidad de servicio (QoS). Quizás la ventaja más importante de WiMAX puede ser potencialmente el bajo costo de implementación debido a su arquitectura IP. Es decir, utilizando arquitectura IP simplificamos el núcleo de la red (en cambio 3G tiene un núcleo de red complejo y separa la voz de los datos) reduciendo así en una reducción del CAPEX y OPEX.

²¹ En telecomunicaciones se habla de "best effort" para definir la forma de prestar aquellos servicios para los que no existe una garantía de calidad de servicio (QoS). Esto implica que no existe una preasignación de recursos, ni plazos conocidos, ni garantía de recepción correcta de la información.

En la tabla de la siguiente página, Tabla 2-1, se muestra de forma más resumida la comparación entre los distintos estándares de banda ancha móvil mencionados en este capítulo.

Parámetro	Fixed WiMAX	Mobile WiMAX	HSPA	1x EV-DO Rev A	Wi-Fi
Estándar	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005	3GPP Release 6	3GPP2	IEEE 802.11a/g/n
Tasa pico DL	9.4Mbps in 3.5MHz with 3:1 DL-to-UL ratio TDD; 6.1Mbps with 1:1	46Mbps ^a with 3:1 DL- to-UL ratio TDD; 32Mbps with 1:1	14.4Mbps using all 15 codes; 7.2Mbps with 10 codes	3.1Mbps; Rev. B will support 4.9Mbps	54 Mbps ^b shared using 802.11a/g; more than 100Mbps peak layer 2 throughput using 802.11n
Tasa pico UL	3.3Mbps in 3.5MHz using 3:1 DL-to-UL ratio; 6.5Mbps with 1:1	7Mbps in 10MHz using 3:1 DL-to-UL ratio; 4Mbps using 1:1	1.4Mbps initially; 5.8Mbps later	1.8Mbps	
Ancho de banda	3.5MHz and 7MHz in 3.5GHz band; 10MHz in 5.8GHz band	3.5MHz, 7MHz, 5MHz, 10MHz, and 8.75MHz initially	5MHz	1.25MHz	20MHz for 802.11a/g; 20/40MHz for 802.11n
Modulación	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM	QPSK, 8 PSK, 16 QAM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Multiplexación	TDM	TDM/OFDMA	TDM/CDMA	TDM/CDMA	CSMA
Dúplex	TDD, FDD	TDD initially	FDD	FDD	TDD
Frecuencia	3.5GHz and 5.8GHz initially	2.3GHz, 2.5GHz, and 3.5GHz initially	800/900/1,800/1,900/2,100MHz	800/900/1,800/1,900MHz	2.4GHz, 5GHz
Cobertura	3–5 miles	< 2 miles	1–3 miles	1–3 miles	< 100 ft indoors; < 1000 ft outdoors
Movilidad	Not applicable	Mid	High	High	Low

a. Asume una configuración de antenas MIMO 2x2 y un ancho de banda de canal de 10 MHz.

b. Debido a la ineficiencia de la capa MAC CSMA, el throughput está limitado alrededor de 20-25 Mbps.

Tabla 2- 1: Comparación entre los estándares Fixed WiMAX, Mobile WiMAX, HSPA, 1x EV-DO y Wi-Fi.

2.3. Introducción a Mobile WiMAX (IEEE 802.16e).

2.3.1. Orígenes del IEEE 802.16.

IEEE 802 es un estudio de estándares internacionales perteneciente al Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), que actúa sobre redes de ordenadores, concretamente y según su propia definición sobre redes de área local (en inglés LAN) y redes de área metropolitana (en inglés MAN). Se centra principalmente en las especificaciones para la capa física y de acceso al medio del modelo de siete capas de interconexión de sistemas abiertos²² (OSI). A continuación en la Figura 2-10 se aprecia una representación de la arquitectura de Internet inalámbrica basada en los protocolos de la familia IEE 802.

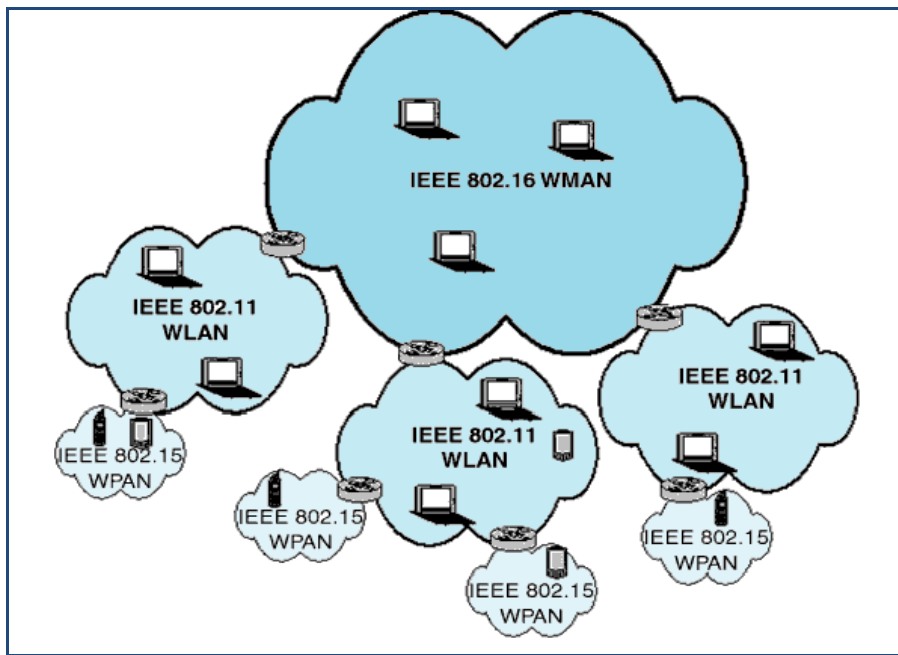


Figura 2- 10: Arquitectura de Internet inalámbrica basada en los protocolos de la familia IEEE 802.

El estándar 802.16, perteneciente a la familia de estándares IEEE 802, se trata de una especificación para las redes de acceso metropolitanas inalámbricas de banda ancha fijas (no móvil) publicada inicialmente el 8 de abril de 2002. En esencia recoge el estándar de facto WiMAX.

²² El modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, Open System Interconnection) fue el modelo de red descriptivo creado por la Organización Internacional para la Estandarización lanzado en 1984. Es decir, fue un marco de referencia para la definición de arquitecturas de interconexión de sistemas de comunicaciones.

También incluye las especificaciones de la capa de control de acceso al medio (MAC) y de la capa física (PHY), pretende dar soporte a los servicios de Internet en las redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN). El estándar actual es el IEEE 802.16-2005, aprobado en 2005.

El estándar 802.16 ocupa el espectro de frecuencias ampliamente, usando las frecuencias desde 2 hasta 11 GHz para la comunicación de la última milla (de la estación base a los usuarios finales) y ocupando frecuencias entre 11 y 60 GHz para las comunicaciones con línea vista entre las estaciones bases.

WiMAX Forum, cuyo logo se expone en la Figura 2-11, es una sociedad sin fines de lucro formada por proveedores que intenta promover la adopción del estándar 802.16 por parte de las operadoras de telecomunicaciones. Es el único organismo habilitado para certificar el cumplimiento del estándar y la interoperabilidad entre equipamiento de distintos fabricantes: todo equipamiento que no cuente con esta certificación, no puede garantizar su interoperabilidad con otros productos.



Figura 2- 11: Logo oficial del organismo WiMAX Forum, responsable del estándar WiMAX.

Con el desarrollo de la tecnología WiFi especialmente con el despliegue *de hot-spots*, las tecnologías inalámbricas de banda ancha para dar acceso a Internet cobran gran interés. Tras muchos esfuerzos, el estándar IEEE 802.16 está considerado una tecnología de nueva generación para reemplazar el *Wireless Local Loop* (WLL) típico en telecomunicaciones, consiguiendo un trabajo comparable al cable tradicional, T1, xDSL...

2.3.2. Evolución de IEEE 802.16.

La tecnología WiMAX comenzó a desarrollarse en el año 1998 con el grupo de trabajo 802.16 del IEEE. En abril del 2002, IEEE 802.16 fue publicado como un estándar para operar en la banda de frecuencias de 10-66 GHz con línea de visión directa para aplicaciones de acceso fijo, punto a multipunto. Puede decirse que el objetivo inicial de este desarrollo era la definición de un sistema tipo LMDS (*Local Multipoint Distribution System*), estandarizado, con el propósito de reducir costes por economías de escala y facilitar asimismo la interoperabilidad entre equipos de otros fabricantes.

La primera enmienda, 802.16a, surgió en enero del 2003 e incluía una única portadora, OFDM y OFDMA para accesos fijos sin línea de visión directa (NLOS) en un rango de frecuencias de 2 a 11 GHz y en principio para aplicaciones fijas. En 2001 se publica el documento 802.16.2, con

recomendaciones de aplicación. En 2002 se publican algunos perfiles para la banda de 10-66 GHz, en el documento 802.16c.

IEEE 802.16 se definió en un principio como FBW (*Fixed Broadband Wireless*) y más tarde, para reflejar los múltiples escenarios que tienen sus aplicaciones, se define como BWA (*Broadband Wireless Access*) con los siguientes requisitos, representados en la Figura 2-12:

- Gran throughput²³ de usuario.
- Alto grado de escalabilidad.
- Calidad de servicio (QoS) para priorizar y optimizar el tráfico de red.
- Alto nivel de seguridad de red.
- Excelente cobertura radio.
- Soporta tanto tráfico en tiempo real como descarga de datos.
- Arquitectura de red flexible.
- Rápido despliegue.
- Servicios a múltiples niveles: La manera de proporcionar la calidad de servicio QoS se define en el SLA (*Service Level Agreement*) acordado entre el proveedor de servicios y el usuario final.
- Interoperabilidad.
- Portabilidad y movilidad.

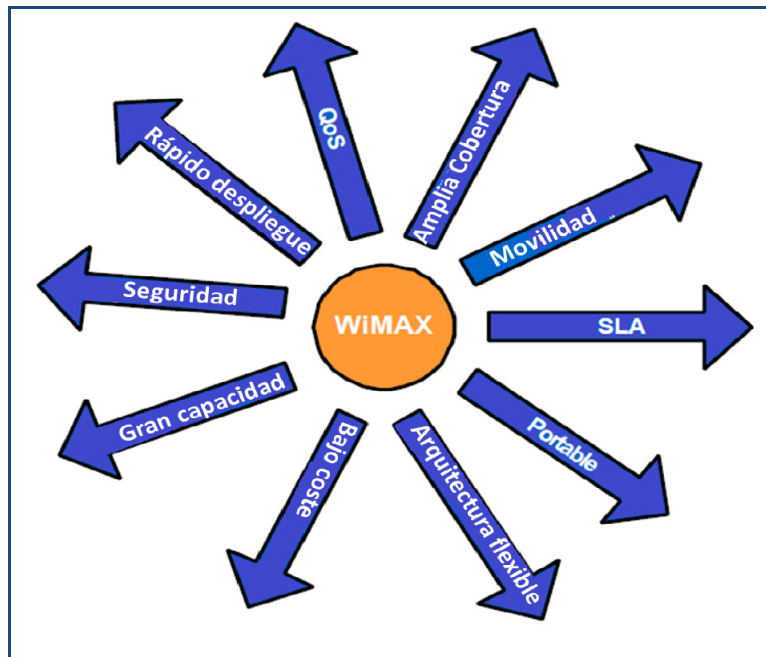


Figura 2- 12: Requisitos fundamentales de WiMAX.

²³ Se llama throughput al volumen de trabajo o de información que fluye a través de un sistema. Así también se le llama al volumen de información que fluye en las redes de telecomunicaciones.

En octubre del 2004 se publicó una revisión del estándar, **802.16-2004**, que daba una solución única al WiMAX fijo. Todos los documentos anteriormente citados se consolidan en este estándar 802.16-2004, conocido como “d”, para aplicaciones fijas.

En 2005 se desarrolló la versión de WiMAX móvil basándose en **802.16e-2005** y con el nombre oficial de “*Capa física y de control de acceso al medio (MAC) para operaciones combinadas fijo/móvil en bandas de frecuencia con licencia*”, popularmente conocido como *Mobile WIMAX*. Incorpora movilidad, con velocidades de transmisión de hasta 15 Mbps en frecuencias inferiores a 6 GHz. Desde un punto de vista formal, esta revisión aparece como enmienda (sobre el documento consolidado de 2004) que permite la operación combinada de bandas con licencia para aplicaciones fijas y móviles.

Prácticamente la mitad de la parte normativa de la revisión 802.16e se dedica a la capa física OFDMA, que se adapta para incorporar la movilidad. Hay que señalar que se introducen también modificaciones en la capa MAC y en el resto de modalidades de la capa física.

La evolución de los estándares de la familia IEEE 802.16 descrita en este epígrafe se expone de forma resumida en la Ilustración 2-13.

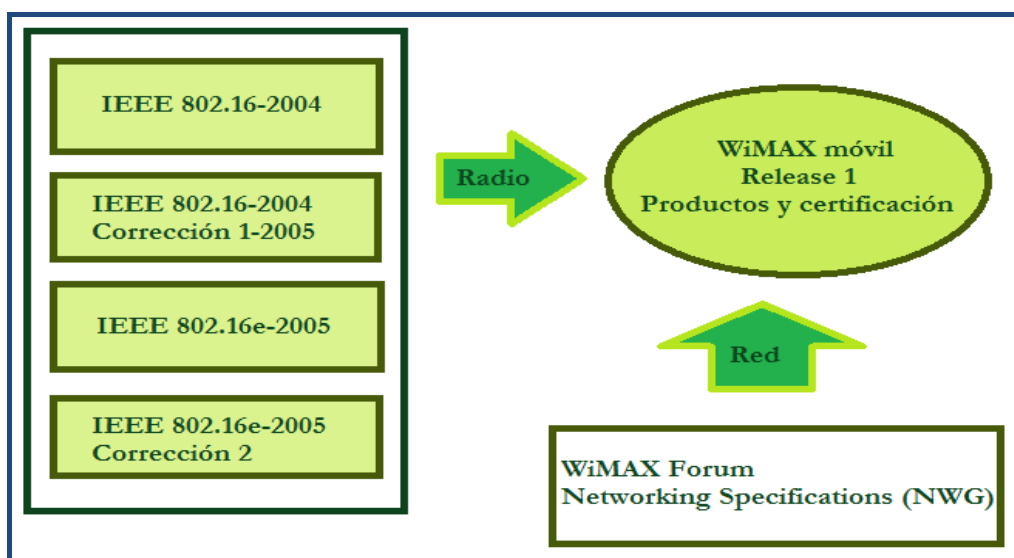


Figura 2- 13: Evolución de la familia de estándares IEEE 802.16.

Desde diciembre del 2006, IEEE 802.16m ha comenzado un nuevo proyecto de investigación para una especificación, **IEEE 802.16 WirelessMAN-OFDMA**, con una interfaz radio avanzada y que pueda incluirse en la especificación *IMT-Advanced* de las redes móviles de cuarta generación.

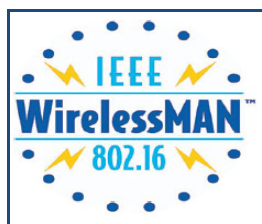


Figura 2- 14: Logo oficial del estándar WirelessMAN 802.16 de IEEE.

El primer despliegue de WiMAX tuvo lugar en un área metropolitana de Seoul (Korea) en 2006 con una versión llamada WiBRO a una frecuencia de 2,3 GHz.

En 2005 se publicó también la enmienda 802.16f, sobre algunos aspectos relativos a la gestión de la red. Desde entonces, se han publicado otras tres enmiendas, denominadas “g” (*Management Plane Procedures and Services*), “j” (*Multiple Relay Specifications*) y “k” (*Bridging*). Están en desarrollo numerosos documentos adicionales, en particular una nueva versión consolidada que incorporará todas las enmiendas aprobadas hasta la fecha.

A modo de breve resumen introducimos la Tabla 2-2 que contiene las distintas especificaciones IEEE 802.16 surgidas a lo largo del tiempo.

Especificación	Año de ratificación	Descripción
802.16	2001	MAC y capa física para acceso inalámbrico de banda ancha fijo en la banda de 10 a 66 GHz.
802.16a	2002	Corrección de la especificación original: nuevas especificaciones para la capa física con rango de frecuencias de 2 a 11 GHz. También se incluye modo de operación para redes malladas.
802.16c	2003	Perfil del sistema para la banda de 10 a 66 GHz.
802.16d	2004	Mejoras de la capa MAC. Conocido como 802.16-2004. Se considera como la especificación base del acceso fijo de banda ancha inalámbrico.
802.16e	2005	Provee soporte específico para la movilidad. Conocido como 802.16-2005. Se considera como la especificación de referencia del acceso móvil de banda ancha inalámbrico.
802.16f	2006	Base de administración de la información.
802.16g	En progreso	Administración de red (plano de control).
802.16h	En progreso	Coexistencia con bandas de frecuencia sin licencia.
802.16i	En progreso	Base de administración móvil de la información.
802.16j	En progreso.	Especificación para la red de transmisión multi-salto.
802.16k	En progreso	Capa MAC como Puente.
WiBRO		Estándar coreano de banda ancha inalámbrico incorporado en la especificación 802.16e.

Tabla 2- 2: Especificaciones de estándares IEEE 802.16.

En los consecutivos desarrollos de las especificaciones de WiMAX las prioridades que existían al principio que eran proporcionar la mayor tasa binaria y obtener la máxima cobertura han evolucionado hacia proporcionar la máxima movilidad y conseguir el máximo número de usuarios tal y como se muestra en la figura inferior.

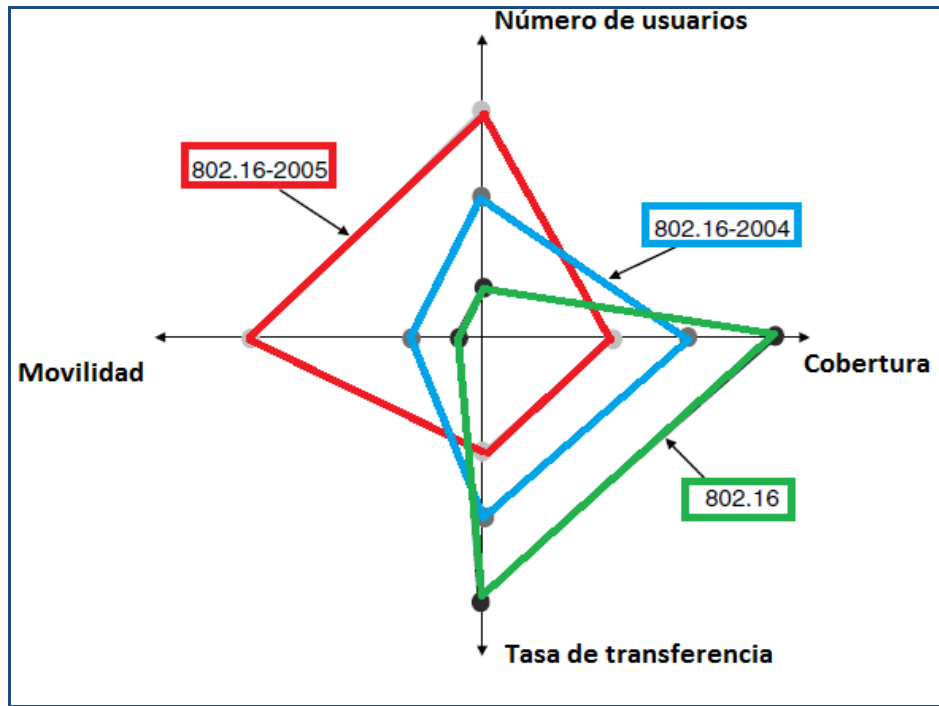


Figura 2- 15: Evolución de las prioridades de WiMAX.

2.3.3. Características sobresalientes de Mobile WiMAX.

En esta sección se comentan las características que hacen de WiMAX una tecnología robusta, fiable y adaptable a cualquier ambiente gracias al gran número de opciones que ofrece y que se comentan a continuación.

2.3.3.1. En la capa física (PHY).

- **Capa física basada en OFDM:** La capa física de WiMAX está basada en OFDM, un esquema que ofrece una buena resistencia al efecto multicamino (multipath) incluso en condiciones NLOS.

- **OFDMA:** Es una técnica utilizada por WiMAX móvil para el acceso múltiple aprovechando la diversidad multiusuario donde cada usuario es asignado a una serie de subportadoras o subcanales.
- **Elevadas tasas de transferencia pico:** Gracias al conjunto de las técnicas de modulación y codificación adaptativa, así como de las múltiples antenas y de la multiplexación espacial, WiMAX permite conseguir una elevadas velocidades máximas. Por ejemplo, utilizando un ancho de banda de 10MHz y el esquema de dúplex TDD con una tasa de 3:1 (3 tramas downlink - 1 trama uplink) la velocidad máxima en capa física es aproximadamente 25 Mbps para downlink y 6.7 Mbps para uplink.
- **Velocidad y ancho de banda escalables:** Esta característica es única para IEEE 802.16e-2005 con el modo escalable OFDMA. Permite adaptar la velocidad con el ancho de banda del canal disponible. Cuanto más grande sea el ancho de banda del canal, más grande será el tamaño de la FFT y eso implica más subportadoras habrán en el canal facilitando un aumento de la tasa de datos o velocidades de transmisión.
- **Modulación y codificación adaptativa):** Esta técnica es una de las principales características que hacen que WiMAX sea una tecnología que se adapte al usuario en función de un canal variante en el tiempo. Esta técnica cambia la modulación y/o la codificación FEC²⁴ teniendo en cuenta la SNR instantánea que el receptor WiMAX recibe en un instante de tiempo. Por esto se llama adaptativa, ya que utiliza la mejor modulación y/o codificación para cada subtrama de usuario que mejora notablemente su velocidad de información.
- **Soporte para técnicas de múltiples antenas:** Además de OFDM y AMC para aumentar la tasa de transmisión, WiMAX permite incorporar antenas adicionales al transmisor/receptor. Concretamente, la velocidad se aumenta gracias a las técnicas de antenas avanzadas tales como: *beamforming*²⁵, codificación en espacio-tiempo, y multiplexación espacial²⁶.

²⁴ La corrección de errores hacia adelante (en inglés, Forward Error Correction o FEC) es un tipo de mecanismo de corrección de errores que permite su corrección en el receptor sin retransmisión de la información original. Se utiliza en sistemas sin retorno o sistemas en tiempo real donde no se puede esperar a la retransmisión para mostrar los datos.

²⁵ *Beamforming*, conformación de haz en español, consiste en la formación de una onda de señal reforzada mediante el desfase en distintas antenas. Sus principales ventajas son una mayor ganancia de señal además de una menor atenuación con la distancia. Gracias a la ausencia de dispersión, el beamforming da lugar a un patrón bien definido pero direccional.

²⁶ Multiplexación espacial consiste en la multiplexación de una señal de mayor ancho de banda en señales de menor ancho de banda iguales transmitidas desde distintas antenas. Si estas señales llegan con la suficiente separación en el tiempo al receptor este es capaz de distinguirlas creando así múltiples canales en anchos de banda mínimos. Esta es una muy buena técnica para aumentar la tasa de transmisión, sobre todo en entornos hostiles a nivel de relación señal ruido. Únicamente está limitado por el número de antenas disponibles tanto en receptor como en transmisor.

2.3.3.2. En la capa de acceso al medio (MAC).

- **Retransmisiones de capa de enlace:** WiMAX utiliza una de las técnicas utilizada en muchas redes de ordenadores que se conoce como ARQ²⁷. Esta herramienta permite retransmitir aquellos paquetes enviados al destino del cual el transmisor no ha recibido ninguna justificación de recepción a través del ARQ. Cada paquete transmitido ha de ser reconocido por el receptor y este último ha de enviar una justificación de la recepción.
- **Soporte por FDD y TDD:** Tanto IEEE 802.16-2004 como IEEE802.16e-2005 soportan dúplex FDD y TDD. TDD será el dúplex definitivo para el futuro de WiMAX ya que dispone de más ventajas:
 - Más eficiencia espectral.
 - Utilizando TDD se pueden tener enlaces asimétricos y por lo tanto más flexibilidad a la hora de escoger las velocidades de downlink y de uplink.
 - Reciprocidad del canal para los dos enlaces.
 - Menos complejidad en los equipos.
- **Asignación dinámica y flexible de los recursos a los usuarios:** La asignación de recursos a los usuarios como ancho de banda en los canales de bajada y subida, es controlado por un programa de la estación base. Aún así, cuando existe diversidad multi-usuario, la asignación puede estar realizada en tiempo (TDM), en frecuencia (OFDM) o en espacio (AAS). El estándar permite la asignación de los anchos de banda en estos tres dominios.
- **Calidad del servicio (QoS):** La capa MAC de WiMAX tiene una arquitectura orientada a conexión que está diseñada para soportar una variedad de aplicaciones, incluyendo servicios de voz y multimedia con una variedad de usuarios con múltiples conexiones/usuario. QoS de WiMAX ofrece tasa de bits constante, tasa de bits variable, flujo de tráfico en tiempo no real, y tráfico de datos *best-effort* de manera que permite adaptarse a los requerimientos QoS de cada conexión de usuario.
- **Soporte para la movilidad:** La variante de WiMAX móvil incluye una serie de mecanismos que permiten al usuario mantener una conectividad móvil, eficiente y muy robusta para aplicaciones tolerantes a los retardos, como VoIP especialmente en casos de cambio de estación base (handover). Técnicas como estimación de canales frecuentes, ahorro de potencia, subcanalización de uplink y control de potencia también son especificados en el soporte para aplicaciones móviles.

²⁷ ARQ (del inglés Automatic Repeat-reQuest) es un protocolo utilizado para el control de errores en la transmisión de datos, garantizando la integridad de los mismos. Éste suele utilizarse en sistemas que no actúan en tiempo real ya que el tiempo que se pierde en el reenvío puede ser considerable y ser más útil emitir mal en el momento que correctamente un tiempo después. Esta técnica de control de errores se basa en el reenvío de los paquetes de información que se detecten como erróneos.

2.4. Estudio de WiMAX *Mobile* IEEE 802.16e.

2.4.1. Capa física (PHY) de WiMAX *Mobile*.

El estándar IEEE 802.16e-2005 soporta tanto la multiplexación en tiempo (TDD) como en frecuencia (FDD). Sin embargo, el lanzamiento inicial de WiMAX está basado en TDD ya que permite asignación dinámica del ancho de banda en los enlaces ascendente (UL) y descendente (DL). Ambos enlaces están en el mismo canal de frecuencia lo que permite la adaptación al enlace, MIMO y técnicas avanzadas de adaptación del diagrama de radiación de las antenas WiMAX.

En el estándar WiMAX, se definen tres especificaciones físicas de interfaces radio:

- **WirelessMAN-SC:** una única portadora modulada.
- **WirelessMAN-SCa:** corresponde a la versión que soporta NLOS de la WirelessMAN-SC, el estándar 802.16-2004 define que debe soportar TDD ó FDD; uso de TDMA en ambos enlaces, UL y DL; uso de codificación FEC en los enlaces UL y DL, entre otras especificaciones.
- **WirelessMAN-OFDM:** esquema de multiplexación por división ortogonal en frecuencia de 256 portadoras. El acceso múltiple de los usuarios se controla a través de TDMA. De las 256 portadoras, 192 se utilizan para la transmisión de datos, 56 para las bandas de guarda y 8 permanecen fijas como portadoras piloto, además de la única portadora DC. En la Figura 2-16 se exhibe los tipos de portadora del esquema descrito.

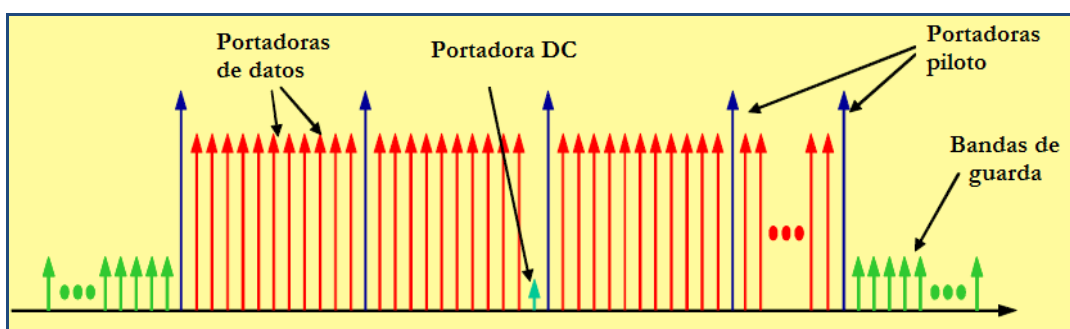


Figura 2- 16: Esquema simplificada de los tipos de portadoras en OFDM.

- **WirelessMAN-OFDMA:** esquema OFDM de 2048 portadoras. El acceso se proporciona asignando un conjunto de portadoras a cada usuario: es una combinación de TDMA y OFDMA.

Las modalidades de Wireless MAN con su modo de dúplex y su aplicación en la banda de frecuencia descritas anteriormente se muestran en la Tabla 2-3.

Modalidad	Aplicación	Dúplex	Ancho de banda
<i>WirelessMAN-SC</i>	10-66 GHz	FDD	28 MHz
		TDD	
<i>WirelessMAN-SCa</i>	< 11 GHz	TDD	1.75 – 20 MHz
		FDD	
<i>WirelessMAN-OFDM</i>	< 11 GHz	TDD	1.75 – 20 MHz
		FDD	
<i>WirelessMAN-OFDMA</i>	< 11 GHz	TDD	1.75 – 20 MHz
		FDD	

Tabla 2- 3: Modalidades de la capa física en IEEE 802.16.

Los anchos de banda y frecuencias de operación definidos por el WiMAX Forum cubren la mayoría de los espectros disponibles en los diferentes lugares del mundo. En la Tabla 2-4 se resumen dichos perfiles de frecuencia siempre para el modo de división en tiempo (TDD).

Ancho de banda del canal	2.3-2.4 GHz	2.305-2.32, 2.345-2.36 GHz	2.496-2.69 GHz	3.3-3.4 GHz	3.4-3.8 GHz
1.25 MHz					
5.0 MHz	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD
7.0 MHz				TDD	TDD
8.75 MHz	TDD				
10 MHz	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD
20 MHz					

Tabla 2- 4: Anchos de banda definidos y frecuencias de operación posibles en WiMAX.

2.4.1.1. Frecuencias de operación y ancho de banda del canal.

La interfaz de aire *WiMAX mobile* adopta una tecnología de acceso múltiple por división en frecuencia ortogonal escalable (SOFDMA), los canales de ancho de banda se dividen en subportadoras que son ortogonales entre sí (generadas a través del algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT)). Se consigue alcanzar una realización multiusuario en unos entornos de visión no directa (NLOS) con los siguientes anchos de banda, para un espaciado entre subportadoras fijo.

$$\text{Ancho de banda} = 1.25 \cdot 2^n \quad n=0, 1, 2, 3, 4 \quad (2.1)$$

Actualmente, WiMAX opera en las frecuencias dentro del rango entre 2-6 GHz del espectro. Aquí, el ancho de banda reservado es más estrecho que el disponible en el rango de 10 a 66 GHz. Las primeras se adecúan más a redes de interconexión con anchos de banda elevados y línea de visión directa, a diferencias de las segundas mencionadas.

2.4.1.1.1. Banda libre de 5GHz.

El rango de frecuencias de interés incluye las bandas entre 5,25 GHz y 5,85 GHz. La banda entre 5,15 GHz y 5,25 GHz es la más utilizada para aplicaciones interiores de baja potencia, por lo que queda fuera del interés de las aplicaciones WiMAX.

En la mayoría de los países se trata de una banda libre, a excepción de algunos donde hay licencias de uso, por lo que esta banda es estratégica para permitir cubrir mercados remotos o rurales con una baja tasa de población, que pueden quedar fuera del interés de los operadores tradicionales.

En la banda superior (5725-5850 MHz) muchos países permiten una mayor potencia de salida lo que hace que la banda sea más atractiva para aplicaciones WiMAX en larga distancia. Además no está tan ocupada ya que está libre de tecnologías Wi-Fi. El WiMAX Forum promueve acciones, especialmente en Europa, para que se libere esta banda de manera armónica, que por ahora sólo se ha realizado en el Reino Unido e Irlanda. Esta banda usará TDD y canales de 10 MHz de ancho.

2.4.1.1.2. Banda con licencia de 3,5GHz.

Se trata de la primera banda utilizada para operadores de banda ancha con licencia, que generalmente se localiza entre los 3,4 y 3,6 GHz, aunque hay nuevas posibilidades en el rango 3,3 y 3,4 GHz (en la actualidad en China, en fase de consultas, y la India, donde ya se ha liberado parte del espectro) y en el 3,6-3,8GHz (donde Francia ha sido la primera, seguida por el Reino Unido, y el resto de Europa y Estados Unidos, donde está en fase de consultas).

Las bandas entre 3,4 y 3,6 GHz han sido reservadas por la mayoría de los países para servicios fijos, móviles y/o por satélite, con la excepción de los Estados Unidos. En estas bandas, el enfoque del foro WiMAX será el de minimizar los requisitos técnicos y reglamentarios no necesarios que puedan inhibir el desarrollo de WiMAX para esta clase de operadores. En ellas se opera tanto con TDD como con FDD, existiendo por lo general canales de 3,5 y 7 MHz.

Las características de la banda la orientan hacia aplicaciones fijas, quedando fuera del objetivo para aplicaciones móviles del 802.16e.

2.4.1.1.3. Banda mixta de 2,5GHz.

Las bandas entre 2,5 y 2,69 GHz han sido reservadas por Estados Unidos, México, Brasil y algunos países de Asia. El WiMAX Forum realiza esfuerzos globales con el objetivo de aumentar la disponibilidad de estas bandas para aplicaciones de banda ancha tanto fija como móvil. Esta banda usa tanto FDD como TDD, con ancho de banda de los canales de 5/6 MHz.

También en Asia, en los países Australia, Corea del Sur y Nueva Zelanda, se utiliza la banda de 2,3 GHz, que se espera que se cubra con los sistemas de 2,5 GHz. Esta banda de 2,3 (llamada WCS) está formada por dos slots de 15 MHz, (2305-2320 MHz y 2345-2360 MHz), con una separación en medio de 25 MHz, debido a que está reservado para servicios de radio digital. Se considera que esta banda intermedia puede suponer una fuente de interferencias.

Esta banda del espectro está orientada al desempeño de servicios móviles, dentro del estándar 802.16e, ya que es la que presenta un mejor comportamiento para este tipo de servicios.

2.4.1.1.4. Otras bandas de frecuencia.

No todo el espectro de radiofrecuencia es igual, las señales se propagan más lejos cuanto menor sea la banda de frecuencia utilizada, creando una relación directa entre el número de estaciones base utilizadas para cubrir un área de servicio dada. De manera más específica, a menor frecuencia, menor número de estaciones base. Como el coste de las instalaciones es determinante a la hora de acelerar el despliegue de operadores, el acceso a bandas de frecuencias menores es fundamental.

Hay ejemplos de países en vías de desarrollo en los que el uso de bandas de frecuencia menores es fundamental para permitir un despliegue. El WiMAX Forum trabaja con organismos reguladores para la reserva de espectro, tanto con licencia como libre, en bandas por debajo del 1 GHz, especialmente en bandas que queden libres en migraciones a televisión digital.

Los beneficios de las soluciones basadas en WiMAX, tanto en espectro con licencia como de uso libre, sobre las soluciones cableadas, son la eficiencia en costes, escalabilidad y flexibilidad. En general, en las bandas de licencia se obtiene una mayor calidad de servicio con un mayor coste de entrada (por la compra del espectro), mientras que las bandas libres de licencia presentan una menor calidad, pero tiene un menor coste y una mayor interoperabilidad.

En la próxima figura aparece un mapa con las frecuencias de operación WiMAX dependiendo de la zona geográfica.

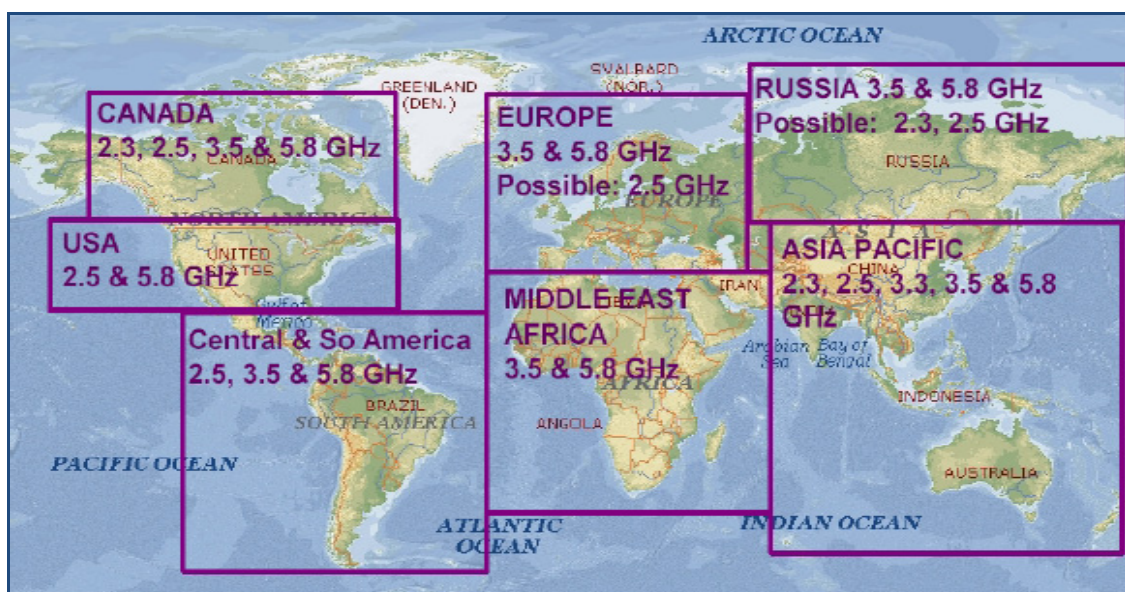


Figura 2- 17: Bandas de frecuencia de WiMAX según la distribución geográfica.

2.4.1.2. Modulación adaptativa

WiMAX soporta varios tipos de modulaciones y codificaciones, las cuales pueden modificarse dinámicamente para cada enlace, dependiendo de las condiciones del canal. Usando un indicador de “calidad de canal”, el móvil puede proveer a la estación base información (*feedback*) sobre la calidad del canal de bajada (*downlink*). Para el caso del enlace ascendente, la estación base puede estimar la calidad del canal sencillamente basándose en la calidad de la señal recibida. El planificador²⁸ de la estación base puede tener en cuenta la calidad del canal de subida o bajada para cada usuario y asignar así el esquema de modulación y codificación que maximice el throughput en función de la relación señal-ruido existente. La modulación y codificación adaptativa puede aumentar sensiblemente la capacidad global del sistema, como así también compensar, en tiempo real y para cada enlace, el throughput por robustez.

La clave de la familia de estándares 802.16 radica en las técnicas de modulación adaptativas que utilizan, principalmente QAM (Modulación de amplitud en cuadratura).

Las modulaciones son automáticamente adaptadas en función de la distancia y condiciones del canal, siendo utilizadas técnicas QAM para el corto alcance y PSK para mayores distancias. La

²⁸ El planificador, en inglés *scheduler*, es un elemento ubicado en la estación base cuya función es la de controlar la asignación de ancho de banda tanto para los enlaces de subida como para los de bajada, por cada canal.

modulación 64QAM brinda la mayor densidad de información por símbolo (lo cual se traduce como mayor throughput) mientras que BPSK da la mayor robustez (menor throughput). Así, para un usuario cercano a la antena de la estación base con una buena señal probablemente se tendrá una modulación 64QAM, pero para un usuario que este en los límites de la celda WiMAX probablemente se use la modulación BPSK. La capacidad de cada subportadora dependerá de la modulación que se utilice, logrando un máximo de 6 bit por subportadora con la modulación 64QAM. En la Ilustración 2-18 se muestran los diagramas de las modulaciones digitales utilizadas en WiMAX.

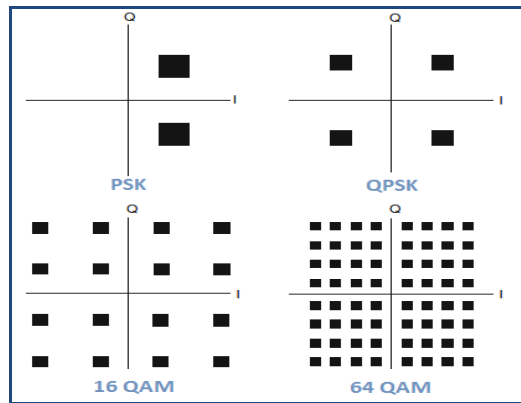


Figura 2- 18: Diagrama de constelaciones de algunas modulaciones digitales soportada por WiMAX.

En WiMAX, los diferentes órdenes de modulación permiten enviar más bits por símbolo y, por tanto, alcanzar un mayor throughput y eficiencia espectral. A pesar de ello, utilizar técnicas de modulación como 64-QAM, implica que sea necesaria una mayor relación señal a ruido (SNR) para evitar las interferencias y mantener una tasa de error de bit moderada.

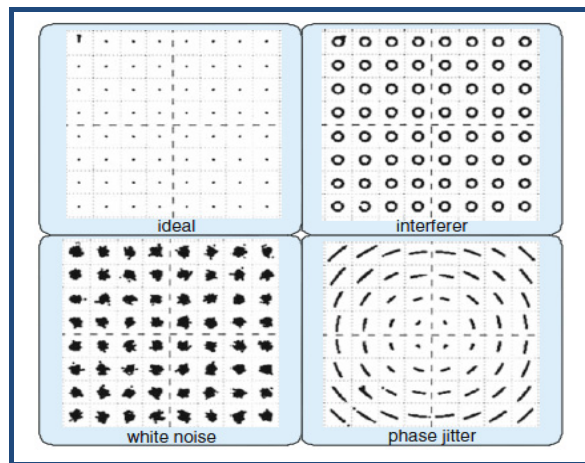


Figura 2- 19: Diagrama de la constelación de 64QAM ideal y con imperfecciones: interferencia, ruido y jitter²⁹.

²⁹ El jitter es un efecto de las redes de datos no orientadas a conexión y basadas en conmutación de paquetes, como las redes IP. El jitter se define técnicamente como la variación en el tiempo en la llegada de los paquetes, causada por congestión de red, pérdida de sincronización o por las diferentes rutas

En la capa física, se definen siete combinaciones posibles de modulación y codificación dependiendo de las condiciones del canal y de interferencias que imponen limitaciones a la tasa y robustez del sistema tal y como se puede observar en la Tabla 2-5.

Modulation rate	Coding	Information bits/symbol	Information bits/OFDM symbol	Peak data rate in 5 MHz (Mb/s)
BPSK	1/2	0.5	88	1.89
QPSK	1/2	1	184	3.95
QPSK	3/4	1.5	280	6.00
16QAM	1/2	2	376	8.06
16QAM	3/4	3	568	12.18
64QAM	2/3	4	760	16.30
64QAM	3/4	4.5	856	18.36

Tabla 2- 5: Modulaciones y valores de codificación posibles en WiMAX.

Los protocolos de WiMAX son altamente adaptativos, y permiten que la estación base ajuste sus parámetros de operación y niveles de potencia con el fin de brindar un óptimo nivel de señal al terminal de abonado (CPE: *Customer Premises Equipment*).

La Tabla 2-6 detalla los distintos tipos de modulación y codificación soportado por WiMAX, así como el valor de SINR permitido para cada modulación según la tasa de código utilizada. Para el enlace de bajada de WiMAX “Móvil”, BPSK es opcional. Para el enlace de subida, 64 QAM es opcional.

Modulación	Capacidad [bit/subportadora]	Tasa de código	SINR (dB)
BPSK	1	1/2	6,4
QPSK	2	1/2	9,4
		3/4	11,2
16QAM	4	1/2	16,4
		3/4	18,2
64QAM	6	2/3	22,7
		3/4	24,4

Tabla 2- 6: Capacidad de la subportadora y valor de SINR mínimo para cada valor de FEC dependiendo de la modulación.

seguidas por los paquetes para llegar al destino. Las comunicaciones en tiempo real (como VoIP) son especialmente sensibles a este efecto. Se espera que el aumento de mecanismos de QoS (calidad del servicio) como prioridad en las colas, reserva de ancho de banda o enlaces de mayor velocidad puedan reducir los problemas del jitter en el futuro.

2.4.1.3. Técnicas de corrección de errores.

Las técnicas de corrección de errores (FEC) han sido incorporadas a WiMAX para reducir los requisitos del sistema en cuanto a la relación señal a ruido. El **Strong Reed Solomon FEC**, la codificación convolucional y los algoritmos de entrelazado se utilizan para detectar y corregir errores y mejorar el throughput. Estas técnicas de corrección robustas ayudan a recuperar las errores que puedan ocurrir por pérdidas de señal a frecuencias determinadas o errores de ráfaga.

Los códigos Reed Solomon se basan en la transmisión extra de símbolos para permitir la detección de errores. Estas características hacen que se adapten muy bien a errores en portadoras. Esto se debe a que no le afecta el número de bits erróneos que hay en cada símbolo, ya que los toma como un único error. Para casos donde los errores no se caracterizan por esto es preferible recurrir a codificaciones convolucionales.

Los códigos convolucionales son un tipo de códigos de corrección de errores, en los cuales un símbolo original de longitud m bits, se transforma en uno de n , siendo $n > m$, siendo la transformación función de los últimos k símbolos de información, con k la longitud del código.

Existen varios algoritmos para la decodificación de los códigos convolucionales. Para valores de k relativamente pequeños, la mejor opción es el algoritmo Viterbi, que provee una solución de máxima verosimilitud. Para valores de k elevados, este algoritmo se vuelve impracticable por lo que se suele recurrir a otros, como el algoritmo Fano. Este tipo de códigos se suele concatenar, como en el caso de WiMAX (en el 802.16-2004), con códigos Reed Solomon.

En WiMAX también se contempla la utilización de otra serie de códigos, pero de manera opcional, como son los turbocódigos, *turbo product codes* o, en el caso 802.16e, códigos de control de paridad de baja densidad.

Por otro lado, *Automatic Repeat Request* (ARQ) se utiliza para corregir los errores que no resuelve el FEC, mediante el reenvío de la información con errores. El estándar WiMAX incorpora la variante llamada H-ARQ (híbrido). Esto mejora de manera significativa la tasa de error de bit (BER) del sistema.

Existen diferentes métodos de implementar H-ARQ: *chase combining*, *rate compatible punctured turbocodes* y redundancia incremental. Este último, también llamado H-ARQ tipo II, en lugar de simples reenvíos de la señal, se envía información redundante adicional para facilitar la decodificación. H-ARQ tipo III es otra técnica de redundancia incremental, pero en la cual cada retransmisión es auto decodificable, cosa que no ocurría en el anterior. *Chase combining* implica la retransmisión del mismo paquete codificado. El receptor se encarga de tratar las múltiples copias del paquete, ponderándolas por la SNR de cada momento de transmisión. Es una técnica de diversidad temporal.

2.4.1.4. Técnicas de control de potencia en el enlace ascendente (uplink).

Los algoritmos de control de potencia se utilizan para mejorar el funcionamiento del sistema. Se implementa este mecanismo en la estación base, enviando información de control de potencia a cada uno de los CPEs³⁰. De esta manera, es posible regular el nivel de potencia transmitida de manera que el nivel recibido en la estación base esté a un nivel predeterminado.

En un entorno con cambios de canal dinámicos, implica que el CPE sólo transmite la suficiente potencia para cubrir los requisitos. En caso de no disponer de este método, el CPE tendría que transmitir a la potencia del peor de los casos, por lo que controlar la potencia produce un ahorro en el consumo del CPE y una reducción de la interferencia potencial con otras estaciones base cercanas.

2.4.2. Capa de Acceso al Medio (MAC) de WiMAX *Mobile*.

La capa de acceso de control al medio (MAC) tiene una topología de red punto a multipunto (PMP), con soporte para la topología de red mallada. 802.16 MAC provee un entorno para servicios orientados a conexión: una vez el receptor entra en la red se crea una o más conexiones con la estación base. También tiene adaptación del enlace según las condiciones y petición de reenvío automática (ARQ). La capa de enlace provee diferenciación de servicios mediante la definición de los parámetros relacionados con la calidad de servicio (QoS) según los requerimientos de las aplicaciones ofrecidas para cada conexión. A su vez, la asignación de ancho de banda e basa en las peticiones realizadas en tiempo real por los terminales.

La tecnología WiMAX cuenta con soporte para la supresión de la sobrecarga de cabecera de los paquetes IP (en inglés PHS, *Packet Header Suppression*) así como compresión de la cabecera IP (en inglés ROHC, *RObust Header Compression*).

La capa MAC soporta las diferentes especificaciones de la capa física usando multiplexación por división en el tiempo donde se les asignan intervalos de tiempo a los usuarios para que accedan al canal correspondiente. TDMA facilita la existencia de diferentes niveles de QoS y un retraso en la comunicación permisible a través de un acuerdo a nivel de servicio³¹. Se puede conseguir utilizando asignación dinámica de ancho de banda a través de un mecanismo de petición/concesión. IEE 802.16 MAC se ha diseñado para coexistir con cualquier protocolo de nivel superior existente o futuro: IP v.4, IP v.6, VoIP, Ethernet, ATM, LAN Virtual... Para ello, 802.16 divide su MAC en

³⁰ CPE (Equipo Local del Cliente) es un equipo de telecomunicaciones usado tanto en interiores como en exteriores para originar, encaminar o terminar una comunicación. El equipo puede proveer una combinación de servicios incluyendo datos, voz, video y un host de aplicaciones multimedia interactivas.

³¹ Un acuerdo de nivel de servicio o Service Level Agreement, también conocido por las siglas SLA, es un contrato escrito entre un proveedor de servicio y su cliente con objeto de fijar el nivel acordado para la calidad de dicho servicio. El ANS es una herramienta que ayuda a ambas partes a llegar a un consenso en términos del nivel de calidad del servicio, en aspectos tales como tiempo de respuesta, disponibilidad horaria, documentación disponible, personal asignado al servicio, etc.

subcapas separadas que se encargan de diferentes servicios: la subcapa de convergencia (CS), que intenta facilitar la comunicación de la MAC con las capas superiores y soportando tanto ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) como una red basada en conmutación de paquetes (IP), la subcapa de partes comunes (CPS), que define el método de acceso al medio, y la subcapa de seguridad, que proporciona privacidad a los usuarios y protección a las operadoras de telecomunicaciones. En la Ilustración 2-20 se muestra el esquema de subcapas mencionado.

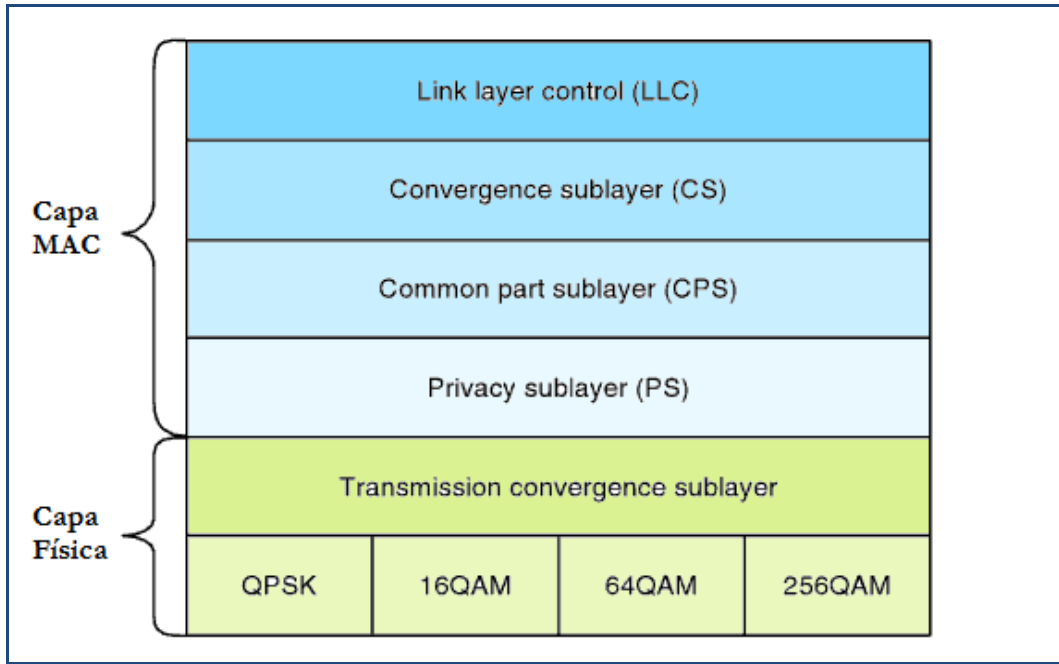


Figura 2- 20: Subcapas de la capa MAC IEEE 802.16.

2.4.2.1. Control de la movilidad en WiMAX.

La característica de movilidad en el estándar WiMAX se interpreta como un usuario móvil cambiando su posición física y por lo tanto su punto de conexión mientras permanece conectado en todo momento a la red. Este proceso de controlar el cambio del punto de acceso del usuario se conoce como traspaso (en inglés *handover*).

La información transmitida entre un transmisor y un receptor en un escenario inalámbrico se ve afectada por el entorno. Este hecho provoca la existencia de uno de los mayores problemas de las comunicaciones radio de banda ancha: la propagación multitrayecto y la interferencia entre símbolos (ISI). La interferencia debida al multitrayecto ocurre porque no hay un único camino de propagación de la señal de información como ocurre en las comunicaciones guiadas. El fenómeno de ISI ocurre porque las señales del multitrayecto llegan al receptor con un cierto retraso temporal e interfieren. Algunas fases se sumarán constructivamente mientras que otras destructivamente eliminarán la señal original. La propagación multitrayecto se ilustra en la Figura 2-21.

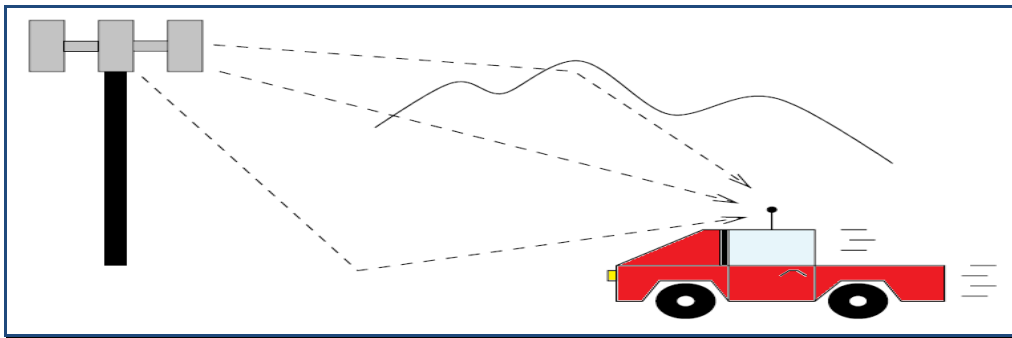


Figura 2- 21: Propagación multitrayecto característica de las comunicaciones móviles.

Para proporcionar la movilidad necesaria a los usuarios, se implementa el protocolo para la transición de una estación base a otra de WiMAX en la capa MAC. Se ha diseñado para dar conexión a vehículos móviles a altas velocidades con el diseño apropiado de la portadora de referencia (piloto) y *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ) que ayuda a mitigar el efecto de la rápida variación del canal de comunicación y la fluctuación de la interferencia.

Las fases para acceder a la red WiMAX son las siguientes:

1. Negociación de capacidad: modulación, esquema de codificación, método dúplex.
2. Autenticación.
3. Registro.
4. Obtención de la conectividad IP.

Existen tres tipos de traspasos especificados: *hard handover* (HHO) que es el traspaso común obligatorio en las redes móviles, el cambio rápido de estación base (FBSS) donde el móvil se comunica con la estación base más cercana dentro del conjunto activo y el traspaso por macrodiversidad (MDHO) donde el usuario se comunica con todas las estaciones base del conjunto activo.

2.4.3. OFDM y OFDMA.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), cuyo significado es Acceso Múltiple por división ortogonal de frecuencia, es una técnica de multiplexación de múltiples portadoras que proviene de la década de 1960, pero que ha resurgido en la actualidad por sus aplicaciones en transmisiones inalámbricas.

La base del OFDM reside en la combinación de múltiples portadoras moduladas solapadas espectralmente, pero manteniendo las señales moduladas ortogonales, de manera que no se producen interferencias entre ellas. Además, es posible utilizar diferentes técnicas de modulación entre portadoras, con lo cual se consigue una funcionalidad extra.

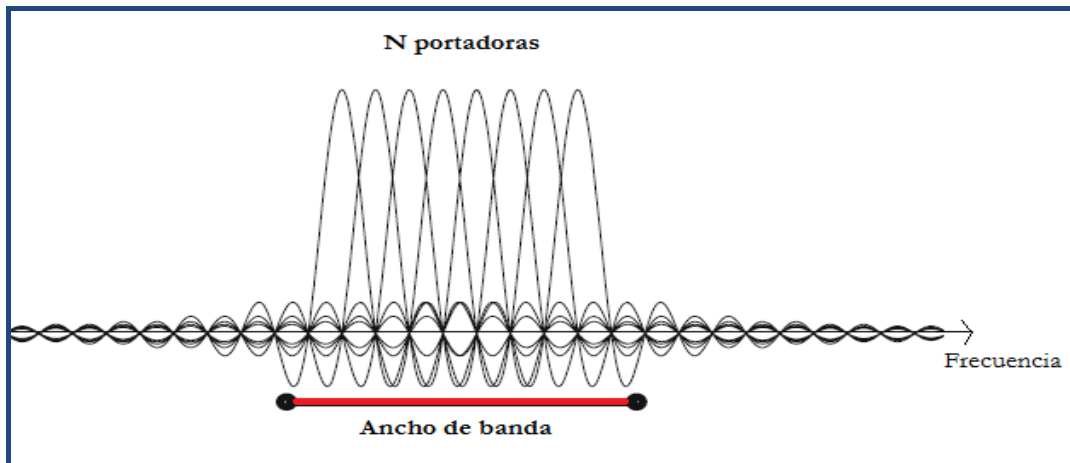


Figura 2- 22: Portadoras ortogonales en OFDM.

OFDM proviene de la modulación por división en frecuencia (FDM), dónde los datos se transmite a través de varias portadoras separadas en frecuencia y nunca solapadas. Sin embargo, en OFDM gracias a la ortogonalidad puede existir solape de las subportadoras lo cual mejora la eficiencia espectral.

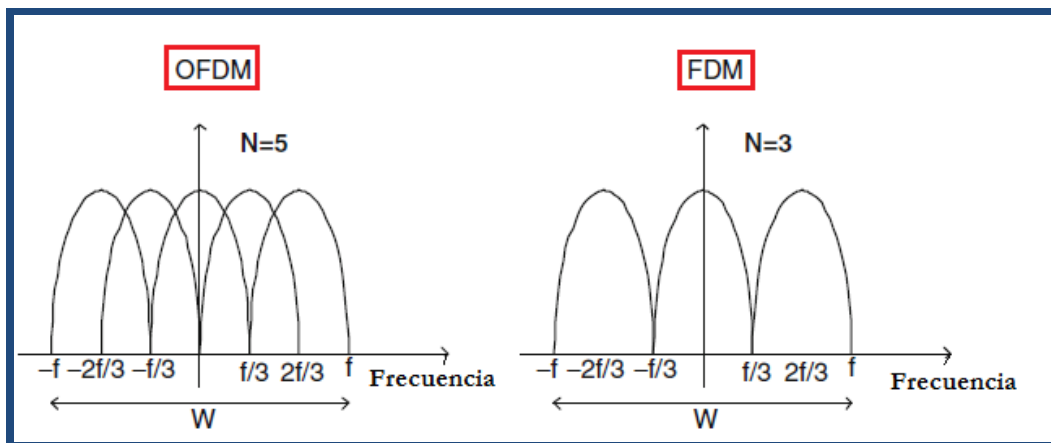


Figura 2- 23: Comparación entre las modulaciones OFDM y FDM.

En recepción las portadoras deben ser separadas antes de demodular. En las técnicas de multiplexación tradicionales FDM, se utilizaban filtros paso banda en cada una de las frecuencias, por lo que además de no solapar las bandas, era obligatoria la reserva de bandas de guarda. Un método de conseguir una mayor eficiencia espectral es solapar las portadoras, mediante el uso de una DFT tanto en modulación como en demodulación, que es en lo que se basa el OFDM. Para ello se hace coincidir los lóbulos espectrales principales con los nulos del resto de portadoras, manteniendo la señal ortogonal.

De esta manera es posible incrementar la eficiencia espectral, sin tener interferencia entre los canales como se demuestra en la Figura 2-25. Pese a ello, en implementaciones reales existe una pequeña interferencia, que provoca que se pierda mínimamente la ortogonalidad.

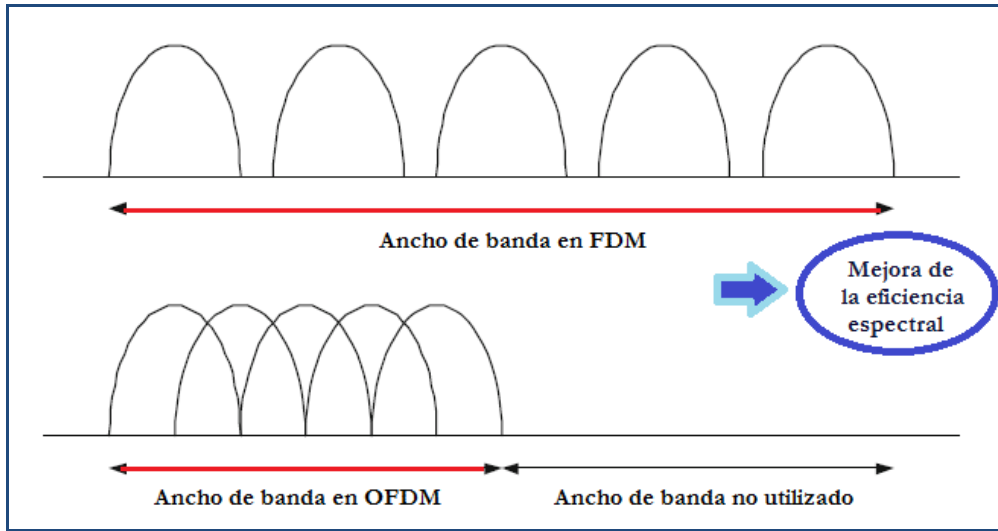


Figura 2- 24: Mejora de la eficiencia espectral de OFDM respecto FDM.

El concepto de OFDM está basado en distribuir la gran velocidad de datos entre un gran número de portadoras a baja velocidad. La ortogonalidad entre las portadoras se consigue usando la transformada rápida de Fourier (FFT).

El principal problema de OFDM es la interferencia entre símbolos (ISI), que está causada por el “goteo” de un símbolo en el período de otro símbolo debido a la interferencia multitrayecto. Para combatirla se introduce un tiempo de guarda antes del símbolo OFDM, este tiempo debe ser mayor que el retraso debido al multitrayecto. La interferencia entre portadoras se soluciona extendiendo cíclicamente el intervalo de guarda.

OFDM incrementa la robustez del sistema frente al desvanecimiento selectivo en frecuencia o la interferencia de banda estrecha debido al desvanecimiento plano en subcanales de frecuencia.

Otra ventaja del OFDM, que es la causa por la que se ha popularizado en la tecnología WiMAX, es la capacidad para gestionar los diferentes retardos que se producen en señales que padecen multitrayecto. En un canal radio estos efectos se traducen en la no respuesta plana del canal, la aparición de nulos, etc. que normalmente conducen a la pérdida completa de la señal. Además, estos multitrayectos pueden producir interferencia entre símbolos, provocado por los diferentes retardos, que hace que se mezclen símbolos consecutivos. Esto se soluciona mediante la utilización de un periodo de guarda para cada símbolo OFDM, trasladando la misma idea que se utiliza en FDM.

Por contra, presenta las desventajas de ser más sensible que las técnicas tradicionales al desfase en frecuencia o desfase en la sincronización temporal. Además, por su carácter ortogonal, presenta una elevada relación *peak-to-average*, condicionando el tipo de amplificadores que se pueden utilizar.

OFDMA consigue el acceso múltiple asignando diferentes subportadoras OFDM a los distintos usuarios. Esta asignación se mantiene sólo durante un cierto periodo de símbolo, después cambia siguiendo un patrón de saltos conocido por el transmisor y el receptor. Es una técnica similar a CDMA que se utiliza para disminuir la interferencia.

Los principales argumentos del uso de OFDMA en la tecnología WiMAX son:

- Tolerancia a la interferencia por multitrayecto.
- Resistencia al desvanecimiento selectivo en frecuencia.
- Ancho de banda escalable.
- Gran compatibilidad con las tecnologías de antenas inteligentes avanzadas.

OFDMA permite a múltiples usuarios transmitir en diferentes subportadoras por cada símbolo OFDM. Así, se asegura de que las subportadoras se asignan a los usuarios que ven en ellas buenas ganancias de canal.

En general existen dos tipos de permutaciones de subportadoras: distribuidas (que se comportan mejor en ambientes de movilidad) y adyacentes (para entornos fijos o de bajo movimiento).

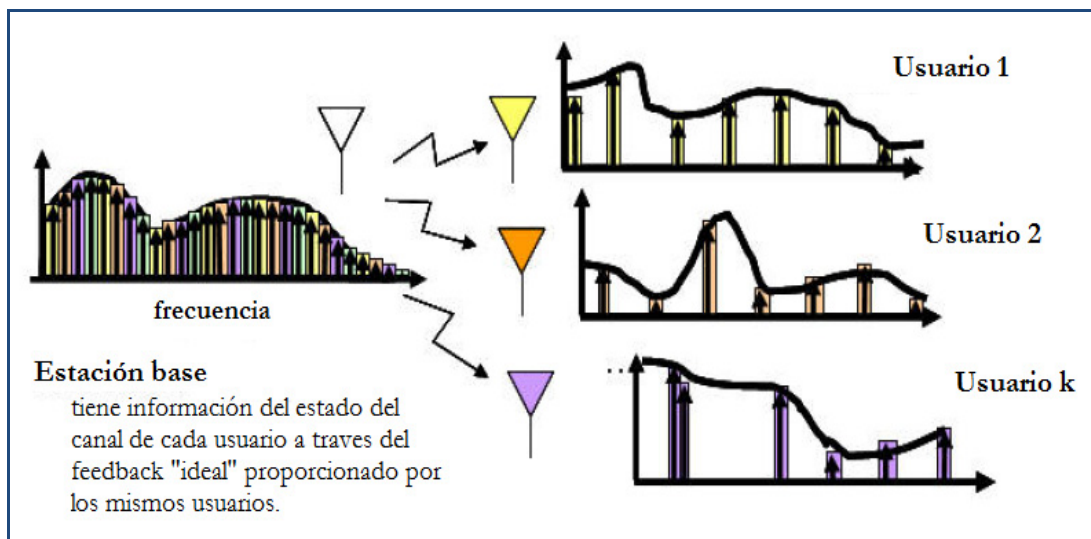


Figura 2- 25: OFDMA, técnica de acceso al medio de WiMAX.

2.4.4. Técnicas avanzadas en WiMAX móvil.

2.4.4.1. Diversidad.

Por diversidad entendemos el uso de varios receptores o técnicas de recepción de señales para aumentar la relación señal a ruido y tratar los problemas de pérdidas provocados por rebotes de señal asociados a entornos multitrayecto. Las técnicas de diversidad proporcionan dos ventajas principales:

- La primera es la **fiabilidad**, ya que es la solución óptima para entornos con canales multitrayecto, al tratar los efectos de los nulos que aparecen por reflexiones. Así, diversos estudios afirman que se producen ganancias de diversidad del orden del 10 dB.
- La segunda es que la **potencia media de señal recibida aumenta**, con lo cual se produce una mejora respecto a los sistemas que no implementan este mecanismo.

En general se habla de tres tipos de diversidad: la espacial (basada en la utilización de múltiples antenas), la de polarización (donde las antenas trabajan con polarizaciones ortogonales) y, por último, la de patrón o ángulo (basadas en el uso de conformación de haz).

2.4.4.2. Antenas inteligentes (*smart antennas*).

Los operadores inalámbricos están explorando nuevas vías para maximizar la eficiencia espectral de sus redes y mejorar el retorno de la inversión. Las antenas inteligentes (*smart antennas*) parecen ser una de las mejores alternativas para lograr ese incremento de la capacidad. Hoy en día, estas antenas están siendo utilizadas en las principales redes inalámbricas, permitiendo rendimientos superiores al 50% respecto al anterior, además de la facilidad de poder orientar el haz de la antena a las necesidades particulares, con las nuevas funcionalidades que pueden ser identificadas.

Las antenas inteligentes proporcionan beneficios en términos de capacidad y funcionamiento respecto a las antenas estándares, ya que pueden adaptar su patrón de radiación para adecuarse a un tipo determinado de tráfico o a entornos difíciles.

Estas antenas son una solución práctica y económica a alguno de los desafíos que presentaba la tecnología WiMAX. Las condiciones del mercado han cambiado, dado que se ofrecen nuevos productos y servicios, que requieren un uso más eficiente del recurso radio. Los operadores pueden emplear diferentes tecnologías en diferentes fases de evolución de la red, por lo que parece una alternativa válida para atender a esas necesidades particulares cambiantes.

Las *smart antennas* mejoran su rendimiento mediante la combinación de las dimensiones espaciales de la antena con la dimensión temporal (throughput). Así se consigue reducir la interferencia de las

celdas vecinas y se incrementa la tasa de transferencia. Existen dos tipos básicos, ambos dibujados de forma esquemática en la Figura 2-27, que son:

- **Antenas de array en fase o haces conmutados:** Pueden usar un número de haces fijos escogiendo el más adecuado o con un haz enfocado hacia la señal deseada que se mueve con ella.
- **Array de antenas adaptativas:** Utilizan múltiples elementos de antena que gestionan la interferencia y ruido recogido con el objetivo de maximizar la recepción de la señal. El patrón del haz varía con el entorno del canal.

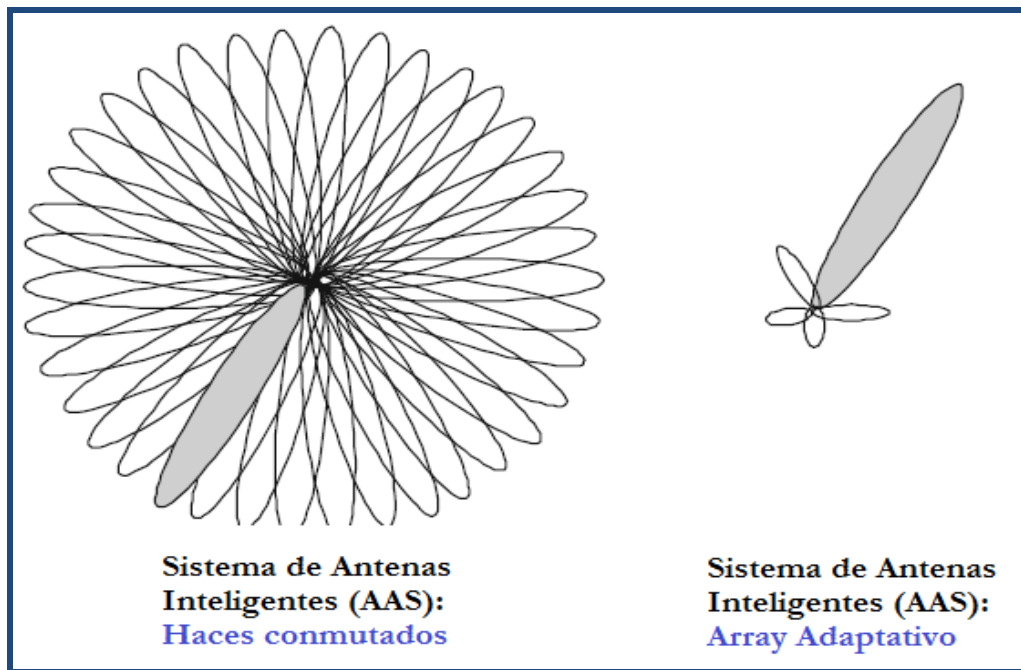


Figura 2- 26: Sistemas de Antenas Adaptativas.

2.4.4.3. MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

Una variedad de sistemas con diversidad son los sistemas MIMO, que utilizan múltiples antenas tanto para recibir como para transmitir. Una transmisión de datos a tasa elevada se divide en múltiples tramas más reducidas. Cada una de ellas se modula y transmite a través de una antena diferente en un momento determinado, utilizando la misma frecuencia de canal que el resto de las antenas. Debido a las reflexiones por multitrayecto, en recepción la señal a la salida de cada antena es una combinación lineal de múltiples tramas de datos transmitidas por cada una de las antenas en transmisión.

Las tramas de datos se separan en el receptor usando algoritmos que se basan en estimaciones de todos los canales entre el transmisor y el receptor. Además de permitir que se multiplique la tasa de

transmisión (al tener más antenas), el rango de alcance se incrementa al aprovechar la ventaja de disponer de antenas en diversidad.

La teoría de capacidad inalámbrica, derivada a mediados de los años 90, extiende el límite del teorema de Shannon, en el caso de la utilización de esta tecnología. Este resultado teórico prueba que la capacidad de transmisión de datos y rango de alcance de los sistemas inalámbricos MIMO se puede incrementar sin usar más espectro de frecuencias. Este aumento es de carácter indefinido, simplemente utilizando más antenas en transmisión y recepción. MIMO requiere la existencia de un número de antenas idéntico a ambos lados de la transmisión, por lo que en caso de que no sea así la mejora será proporcional al número de antenas del extremo que menos tenga.

Los detractores de la tecnología mencionan los costes elevados de instalación y hardware, así como la elevada potencia necesaria como las barreras para llegar a convertirse en una tecnología con una adopción masiva. En realidad, con la densidad de integración microelectrónicas actuales, se están llevando al mercado las primeras soluciones a precio razonable. En cuanto al consumo, el factor más crítico es el consumo de los amplificadores de potencia en la transmisión, pero recientes avances nos dicen que los sistemas MIMO pueden ser diseñados para transmitir la misma potencia que un transmisor tradicional.

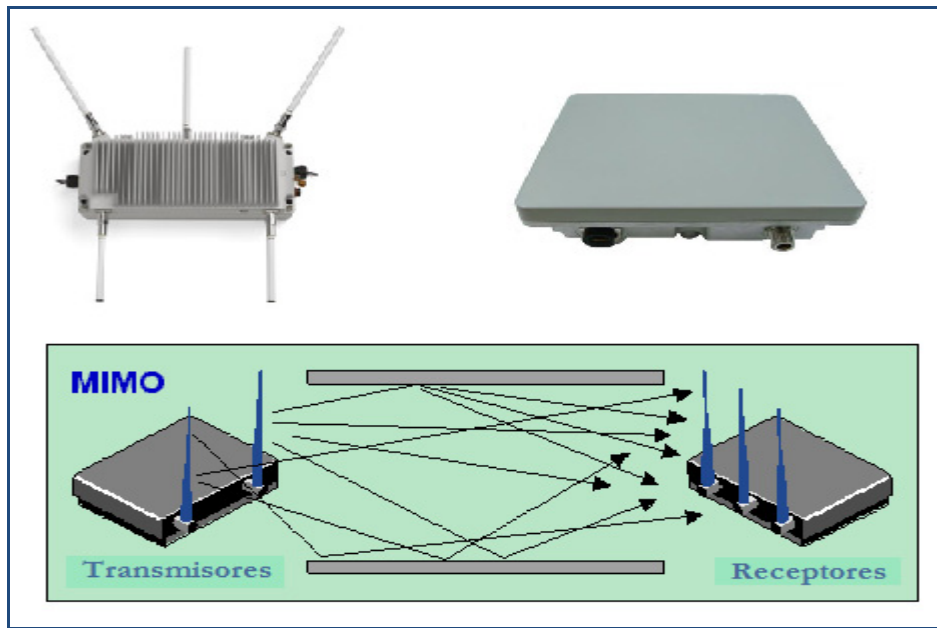


Figura 2- 27: Ejemplo de antenas MIMO en WiMAX.

2.4.4.4. Esquema mejorado de reutilización de frecuencias.

WiMAX móvil adopta un esquema simple de reutilización de frecuencias con un esquema de uso parcial de subportadoras PUSC (*Partial Usage of Sub-Carriers*). La división en el tiempo para DL/UL puede ocasionar colisiones por lo que se intenta el siguiente esquema de utilización de frecuencias 1x3x1 cerca de la estación base y 1x3x3 cerca de los bordes de la celda tal y como se muestra en el siguiente dibujo, Figura 2-29:

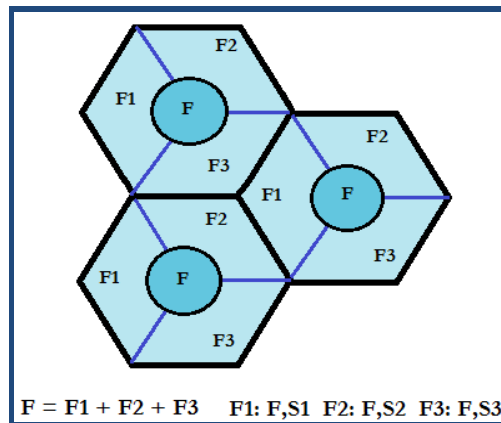


Figura 2- 28: Esquema de reutilización de frecuencias en WiMAX Mobile.

El factor de reutilización de 1 en el centro maximiza la eficiencia espectral mientras que el factor mayor en los bordes disminuye el efecto de la interferencia cocanal. Una característica muy importante de WiMAX móvil es la comunicación entre la estación base y el receptor de la frecuencia, intervalo de tiempo y ajuste de potencia que se realiza tanto la primera vez que se conectan como de forma periódica.

2.5. Arquitectura de red WiMAX.

WiMAX nació para soportar la tecnología IP de forma nativo por lo que el WIMAX Forum incluye una arquitectura de red para soportar la tecnología de acceso, siguiendo la tendencia de las Redes de Nueva Generación (NGN), donde las aplicaciones son independientes de la tecnología de transporte mediante una arquitectura horizontal, pero vertical en cuanto a la infraestructura de telecomunicaciones.

802.16e solo define las capas física y de acceso al medio. Sin embargo, la arquitectura de red diseñada en base a WiMAX móvil se desarrolla sobre una plataforma todo IP con tecnología de conmutación de paquetes y sin ningún tipo de conmutación de circuitos. Se trata de una arquitectura de red de telecomunicaciones integrada que usa IP para transportar tanto el tráfico de usuario como el correspondiente a señalización (control). Los núcleos de red que usan routers y

conmutadores IP (*switches*) son más sencillos de instalar, controlar y escalar que las redes basadas en circuitos.

WiMAX soporta todo tipo de topologías de red: punto a punto, punto a multipunto o punto a consecutivos puntos, creando un bucle cerrado a través de topologías anidadas punto a punto.

Los principios básicos de la arquitectura de red de WiMAX móvil se enumeran a continuación:

- Separación de la red de acceso de la conectividad IP.
- Organización en una estructura plana, jerárquica o mallada.
- Soporte para todo tipo de usuarios: fijos, móviles, nómadas...
- Posibilidad de *roaming*³² global e interconexión con otras redes inalámbricas.

En la siguiente ilustración, Figura 2-30, está diseñado un esquema de la arquitectura básica WiMAX: usuarios móviles conectados a diferentes estaciones base WiMAX con área de cobertura solapada y conectadas al mismo núcleo de red IP.

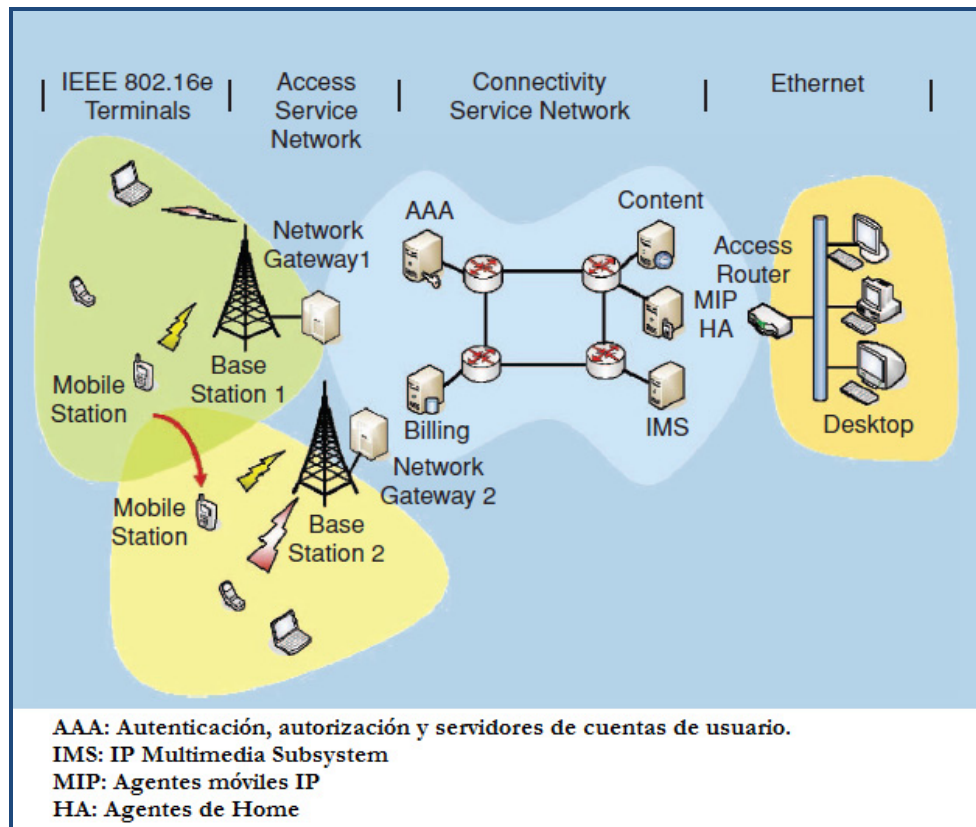


Figura 2- 29: Arquitectura básica de la red WiMAX.

³² La itinerancia (en inglés, y popularmente, *roaming*) es un concepto utilizado en comunicaciones inalámbricas que está relacionado con la capacidad de un dispositivo para moverse de una zona de cobertura a otra. El concepto de *roaming*, utilizado en las redes Wi-Fi, significa que el dispositivo Wi-Fi cliente puede desplazarse e ir registrándose en diferentes bases o puntos de acceso. En telefonía móvil, es la capacidad de enviar y recibir llamadas en redes móviles fuera del área de servicio local de su compañía, es decir, dentro de la zona de servicio de otra empresa del mismo país, o bien durante una estancia en otro país diferente, con la red de una empresa extranjera.

La arquitectura de red, como se ilustra en la Figura 2-31, consiste en tres partes fundamentales:

1. **Terminales de usuario** (fijo/móviles).
2. **Red de acceso** (ASN): agregación de las entidades funcionales y mensajes de flujo asociados con los servicios de acceso.
3. **Red del servicio de conectividad** (CSN): funciones de red que provee conectividad IP a los usuarios de WiMAX.

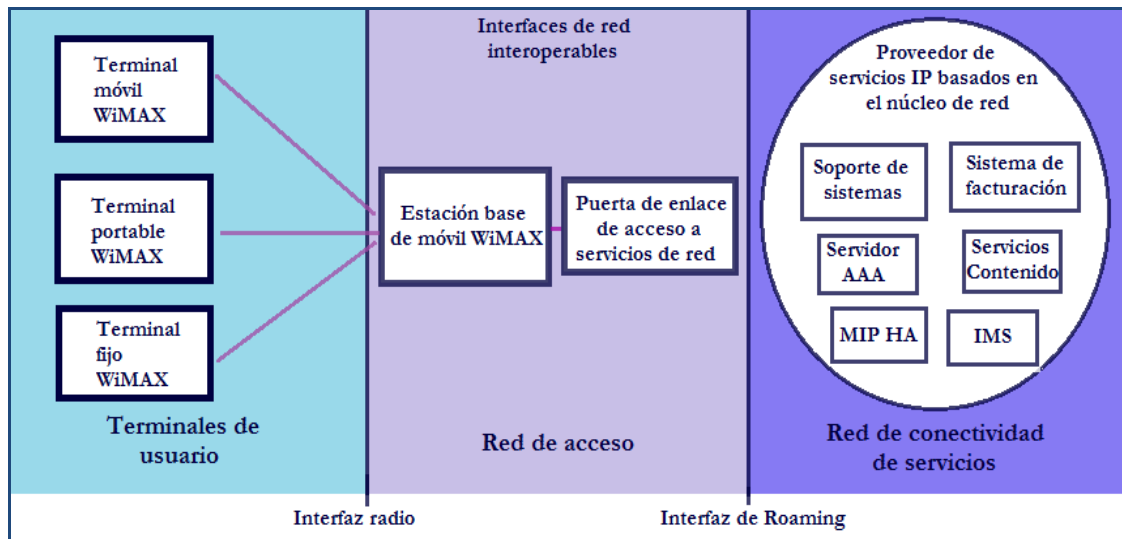


Figura 2- 30: Esquema de arquitectura de red WiMAX basada en IP.

Mobile WiMAX usa una estructura celular, similar a GSM. Del lado del operador, el elemento más necesario es la estación base o antena transmisora. Una característica que optimiza el rendimiento del sistema es el uso de técnicas avanzadas de antenas como MIMO y el uso de antenas inteligentes (sistema de antenas adaptativas). Además de las técnicas mencionadas, la capacidad puede incrementarse instalando varios sectores en cada sitio, pudiendo dar servicio a múltiples usuarios simultáneos. Las estaciones bases deben situarse a una cierta altura para que la señal no sea bloqueada por edificios adyacentes.

Una vez instaladas, las antenas se conectan al controlador de acceso WiMAX a través de la red troncal. Este elemento será responsable, principalmente, del control del acceso y la asignación de direcciones IP.

Desde la posición del cliente, el equipo imprescindible es el terminal receptor WiMAX, conocido comúnmente como Equipo de Premisas del Cliente (CPE). Como tiene que capturar las señales radio debe tener una antena integrada.

El modelo del sistema simulado sería una celda en una red WiMAX con una estación base y múltiples estaciones receptoras, como está expuesto en la figura a continuación:

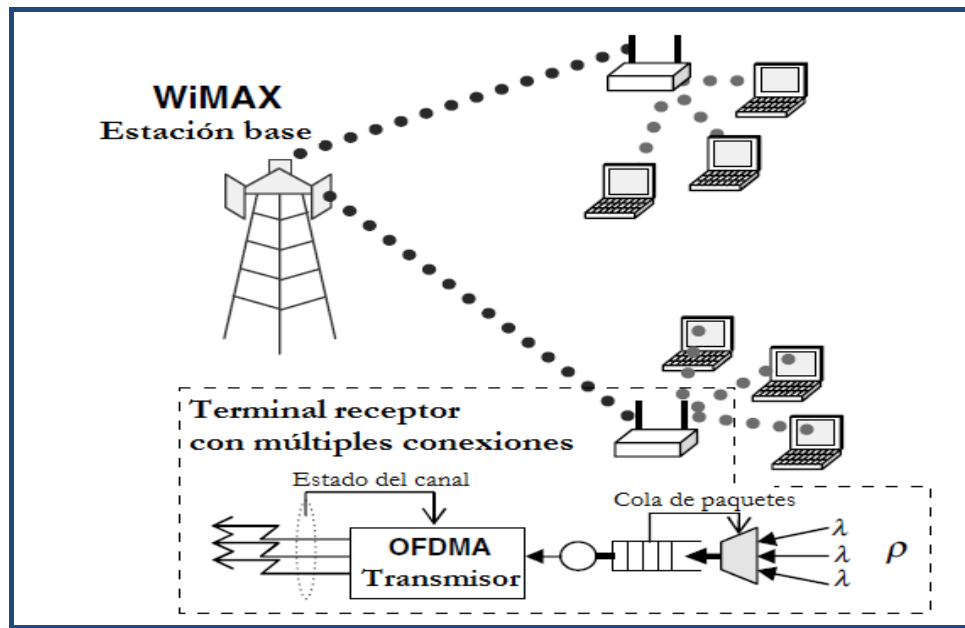


Figura 2- 31: Modelo de simulación simplificado de una red WiMAX.

Cada receptor sirve a múltiples conexiones. El control en la admisión se usa en cada terminal para limitar el número de conexiones existentes. En cada terminal receptor, el tráfico se almacena en una única cola de paquetes con tamaño fijo por lo que si hay congestión en la red algunos paquetes pueden ser desechados. La estación base asigna los diferentes subcanales de frecuencia a los receptores.

En el Anexo B, titulado “Elementos de la arquitectura WiMAX móvil”, se mostrará con mayor detalle los componentes WiMAX dando nombres de equipos específicos así como sus características.

2.6. Convergencia de WiMAX.

Las redes de acceso celulares han evolucionado hacia la convergencia de las tecnologías IP y OFDMA. Las tecnologías de redes de acceso basadas en estos principios, WiMAX, LTE, HSPA... necesitan la posibilidad de interconexión entre ellas para lograr el objetivo de una red de telecomunicaciones única. La convergencia fijo-móvil junto con la convergencia de los servicios y los dispositivos dotaría de simplicidad y conveniencia a los usuarios para conseguir comunicaciones a bajo coste y con las mejores prestaciones.

La convergencia de los dispositivos entendida dentro del marco de convergencia fijo-móvil introduce funcionalidad diversa en un único terminal y trabaja conjuntamente con la convergencia de red para proveer conexión a los servicios usando la tecnología de acceso más conveniente en

cualquier lugar o momento. Las redes fijas y móviles serán capaces de compartir los recursos disponibles e interactuar para mejorar la eficiencia global de la red.

De los dos estándares de la cuarta generación, WiMAX y LTE de 3GPP, ninguno se ha impuesto como predominante sobre el otro en las comunicaciones del futuro. Este hecho indica que será posible que tengan que coexistir ambas tecnologías. Para ello serán necesarios protocolos de pasarela entre ambos para que el usuario pueda utilizar ambos sin percibir ningún problema.

En un futuro, los dispositivos adaptados a varias tecnologías radio serán comunes en el mercado. Cada tecnología de acceso diseña su propio modo de integración con el resto de tecnologías. Se necesita un estándar de convergencia que sea transparente a la tecnología de acceso utilizada. Se tendrá que desarrollar una funcionalidad común para realizar traspasos tanto homogéneos (entre estaciones base con la misma tecnología como un posible *handover* de la zona 1 a la zona 2 en la Figura 2-33) como heterogéneos (entre distintas tecnologías radio: traspaso de la zona 2 a la zona 8 en la Figura 2-33).

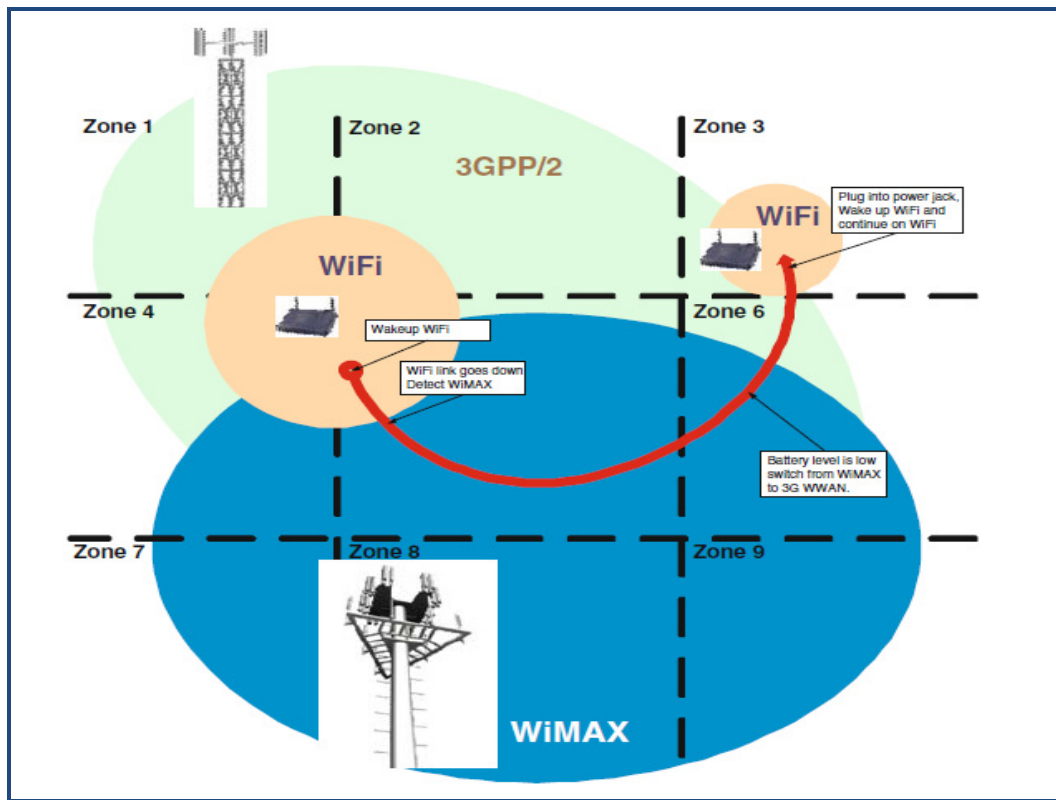


Figura 2- 32: Escenario de convergencia entre 3GPP, 3GPP2, WiFi y WiMAX.

WiMAX coexistirá con diferentes tecnologías existentes y emergentes tanto cableadas como inalámbricas. Aunque es capaz de soportar VoIP, WiMAX no competirá ni reemplazará a las tecnologías de 2G dedicadas a servicios de voz (GSM, CDMA). Las redes móviles GSM proveen la cobertura tan amplia que necesitan los servicios de telefonía y para los cuales no está diseñada la tecnología WiMAX. Las tecnologías 3G cubren una superficie considerable pero no son capaces de proporcionar toda la capacidad necesaria para servicios de datos. Para ello, existe WiMAX que

proporciona mayor cobertura que Wi-Fi. Además, WiMAX se encarga de proporcionar la movilidad que los usuarios necesitan y que las tecnologías de banda ancha fija no pueden suministrar. Este escenario se muestra en la Figura 2-34.

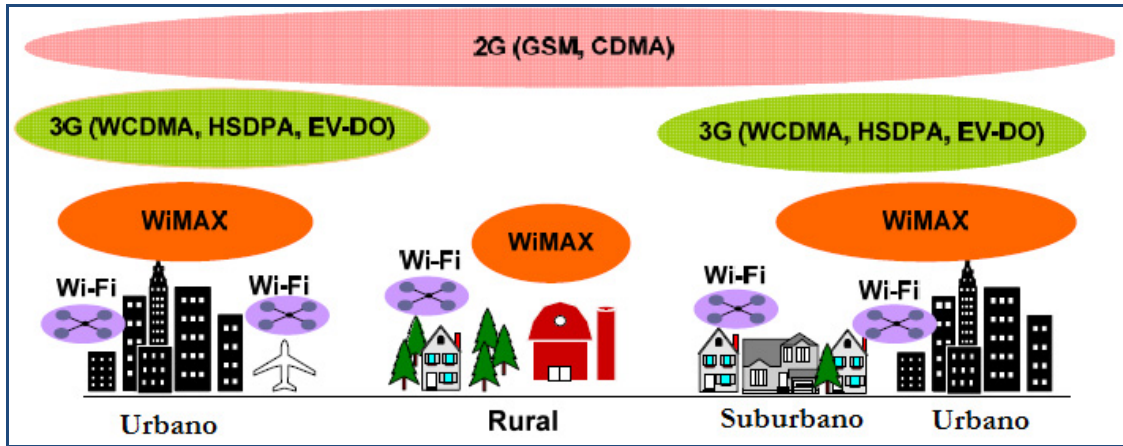


Figura 2- 33: Coexistencia de las tecnologías inalámbricas.

2.7. Nueva Generación de Mobile WiMAX: IEEE 802.16m.

2.7.1. Introducción.

Mobile WiMAX fue la primera solución de acceso de banda ancha inalámbrica que permitió la convergencia de las redes fijas y móviles a través de una tecnología de acceso radio de gran cobertura común y una arquitectura de red flexible.

Dependiendo de la disponibilidad del ancho de banda y de la configuración de las antenas, la futura generación de WiMAX móvil hará posible la transferencia de datos inalámbrica a tasas alrededor de 1 Gbps y soportará un extenso rango de aplicaciones y servicios de gran calidad y capacidad sobre IP. A su vez, deberá mantener total compatibilidad con antiguas versiones de WiMAX para asegurar las inversiones económicas realizadas.

Las características de IEEE 802.16m se elegirán para asegurar la competitividad con el resto de tecnologías emergentes de acceso radio de cuarta generación y eliminar los inconvenientes de los anteriores sistemas WiMAX.

2.7.2. Características principales de IEEE 802.16m.

En la próxima tabla se describen las características estándar de la futura especificación de WiMAX Mobile IEEE 802.16m.

Frecuencia portadora	Banda con licencia por debajo de 6 GHz
Ancho de banda	5-20 MHz (superior a 100 MHz con la técnica de agregación de bandas).
Dúplex	Full-duplex, half-duplex FDD, TDD
Antenas	Enlace descendente ≥ 2 TX ³³ , 2 RX ³⁴ Enlace ascendente ≥ 1 TX, 2 RX
Latencia de la capa de datos	< 10ms
Latencia de la capa de control	< 100 ms
Tiempo de traspaso	Intrafrecuencia < 30 ms Interfrecuencia < 100 ms
Eficiencia espectral	2 – 4 bps/Hz (depende de la distancia entre estaciones base)
Movilidad	Velocidades de hasta 500 km/h con rendimiento óptimo para velocidades hasta 10 km/h

Tabla 2- 7: Características principales de IEEE 802.16m.

³³ TX: diminutivo utilizado para referirse a la antena transmisora WiMAX.

³⁴ RX: diminutivo utilizado para referirse al terminal receptor WiMAX.

En la Tabla 2-8 se muestra el throughput teórico del estándar IEEE 802.16m.

	Enlace descendente	Enlace descendente
Throughput medio por sector (bps/Hz/sector)	2,6	1,3
Throughput medio usuario (bps/Hz)	0,26	0,13
Throughput usuario en el borde de la celda (bps/Hz)	0,09	0,05
Capacidad para Voz sobre IP (VoIP)³⁵	30	30
(llamadas activas/MHz/sector)		

Tabla 2- 8: Valores de throughput del IEEE 802.16m.

A modo de resumen, se describen a continuación los aspectos más destacados de IEEE 802.16m que provocarán una mejora en el rendimiento de los sistemas WiMAX.

- **Soporte para mayor movilidad:** Las velocidades de hasta 350 km/h son posibles gracias a la adaptación al enlace, retrasos menores en el acceso y sistemas de feedback más rápidos así como a los mejores cambios y trasposos de celda.
- **Mayor eficiencia espectral y tasas de transferencia pico:** La eficiencia espectral en el enlace descendente y en el ascendente son 15 y 6,75 bps/Hz usando las configuraciones de antena MIMO 4 x 4 y 2 x 4, respectivamente.
- Esquemas avanzados de configuración de **antenas MIMO** con capacidades de flujo único y multi-flujo para cada usuario.
- **Menor sobrecarga y mayor eficiencia** que se traducirá en un incremento de la capacidad.
- **Menores tiempos de latencia.**
- Mejora del tráfico y del radio de actuación del canal de control, mejora del enlace y del rendimiento en los extremos de la celda: WiMAX proveerá rendimiento óptimo para tamaños de celda hasta 5 km y mantendrá la funcionalidad para celdas de hasta 100 km.
- **Reducción del consumo de potencia** del terminal móvil.

³⁵ Se utiliza un códec de 12.2 Kbps con un factor de actividad del 50% de tal forma que el porcentaje de usuarios que experimentan una comunicación fallida es menor del 2% (entendiendo por comunicación fallida que se reciban con éxito menos del 98% de los paquetes IP con un retraso máximo permitido de 50 ms). Además, debe recalcarse que la capacidad de VoIP es el mínimo de las capacidades calculadas para el enlace ascendente (UL) y el enlace descendente (DL).

2.7.3. Mejoras en la próxima generación de WiMAX Mobile.

Otras áreas funcionales de mejora en la próxima generación de WiMAX móvil son:

- Flexibilidad en el despliegue a través del uso de esquemas de transmisión bidireccional en tiempo y en frecuencia y uso de esquemas de planificación complementarios.
- Soporte para arquitecturas móviles basadas en multi-saltos (multi-hop) con transmisión y enlaces de de acceso unificados.
- Posibilidad de adaptarse a las diferentes clases de bandas IMT (de 450 a 3600 MHz).
- Soporte para multi-portadora y ancho de bandas hasta 100 MHz a través de la agregación de canales de radiofrecuencia.
- Provisión para la coexistencia de multi-radios para el mismo terminal de usuario minimizando la interferencia entre radios y las interrupciones de la comunicación.
- Habilitar los traspasos entre frecuencias y entre distintas tecnologías de acceso.
- Mejora del rendimiento de las aplicaciones y servicios ofrecidos.

2.7.4. 4G: IEEE 802.16m.

IMT-Advanced, nombre otorgado por la ITU al estándar global que acoge a las futuras tecnologías de cuarta generación (4G), ha reunido una serie de requisitos como una interfaz radio que soporte tasas de 100 Mbps en escenarios de gran movilidad del usuario y de hasta 1 Gbps para escenarios con movilidad escasa o nula.

Aparte de WiMAX móvil, existen otras tecnologías que compiten por la supremacía en la banda ancha móvil como son LTE (Release 8), de 3GPP, y UMB (CDMA2000 1xEV -DO Rev-C), de 3GPP2 como se esquematiza en la Figura 2-35.

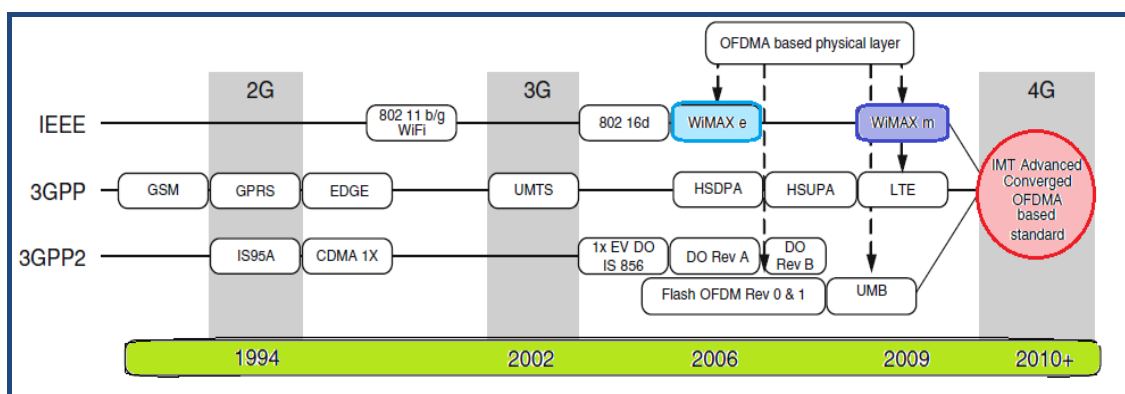


Figura 2- 34: Evolución cronológica de los estándares de IEEE, 3GPP y 3GPP2.

WiMAX móvil basado en la especificación IEEE 802.16e no está cualificado para formar parte de la nueva especificación de la ITU para las futuras tecnologías 4G, *IMT-Advanced*, pero la nueva tecnología de WiMAX móvil, IEEE 802.16m, satisfará los requerimientos de la cuarta generación (4G). En la tabla posterior, Tabla 2-9, se muestra una comparación entre los requisitos especificados en el estándar *IMT-Advanced* y los correspondientes para WiMAX *Mobile*, IEEE 802.16m.

Requisitos	IMT-Advanced	IEEE 802.16m
Tasa de datos pico (b/s/Hz)	DL: 15 (4 × 4) UL: 6.75 (2 × 4)	DL: 8.0/15.0 (2 × 2/4 × 4) UL: 2.8/6.75 (1 × 2/2 × 4)
Eficiencia espectral por celda (b/s/Hz/sector)	DL (4 × 2) = 2.2 UL (2 × 4) = 1.4 (base coverage urban)	DL (2 × 2) = 2.6 UL (1 × 2) = 1.3 (mixed mobility)
Eficiencia espectral usuario en el límite de la celda (b/s/Hz)	DL (4 × 2) = 0.06 UL (2 × 4) = 0.03 (base coverage urban)	DL (2 × 2) = 0.09 UL (1 × 2) = 0.05 (mixed mobility)
Latencia	C-plane: 100 ms (idle to active) U-plane: 10 ms	C-plane: 100 ms (idle to active) U-plane: 10 ms
Movilidad (b/s/Hz a km/h)	0.55 at 120 km/h 0.25 at 350 km/h (link-level)	Optimal performance up to 10 km/h Graceful degradation up to 120 km/h Connectivity up to 350 km/h Up to 500 km/h depending on operating frequency
Tiempo interrupcion en el traspaso (ms)	Intrafrequency: 27.5 Interfrequency: 40 (in a frequency band) 60 (between frequency bands)	Intrafrequency: 27.5 Interfrequency: 40 (in a frequency band) 60 (between frequency bands)
Capacidad de VoIP (usuarios activos/sector/MHz)	40 (4 × 2 and 2 × 4) (Base coverage urban)	60 (DL 2 × 2 and UL 1 × 2)
Configuración de antenas	Not specified	DL: 2 × 2 (baseline), 2 × 4, 4 × 2, 4 × 4, 8 × 8 UL: 1 × 2 (baseline), 1 × 4, 2 × 4, 4 × 4
Tamaño de celda y cobertura	Not specified	Up to 100 km Optimal performance up to 5 km
Ancho de banda utilizado (MHz)	Up to 40 MHz (with band aggregation)	5 to 20 MHz (up to 100 MHz through band aggregation)
Esquema dúplex	Not specified	TDD, FDD (support for H-FDD terminals)
Frecuencias de operación (MHz)	IMT bands 450–470 698–960 1710–2025 2110–2200 2300–2400 2500–2690 3400–3600	IMT bands 450–470 698–960 1710–2025 2110–2200 2300–2400 2500–2690 3400–3600

Tabla 2- 9: Requisitos del estándar global *IMT-Advanced* de la ITU y de WiMAX 802.16m.

2.8. WiMAX: pasado, presente y futuro.

Para conseguir que una tecnología se imponga sobre otras es necesario encontrar el escenario exacto dónde esta tecnología no tenga competidores. En el caso de WiMAX, dicho escenario ha cambiado con la evolución de la propia perspectiva tecnológica y de marketing. La primera especificación estaba orientada a una conexión punto a punto, con alta tasa de transferencia y línea de visibilidad directa entre plataformas fijas. Más tarde, el escenario de uso de WiMAX se amplió a proporcionar conexión a los usuarios finales con la red troncal. Por último, el último escenario posible fue con la movilidad de los usuarios. La creencia más extendida es que este escenario será adoptado por proveedores de servicio inalámbrico nuevos y no incumbentes aunque también compite con otras tecnologías. Pero no son más especulaciones ya que como pasó con anteriores tecnologías el mercado decidirá cuáles son los escenarios de uso viables. A continuación se muestra una visión general del *roadmap* para los estándares y productos de WiMAX. El primer lanzamiento, Release 1, se corresponde con IEEE 802.16e. Mientras, la revisión 2, release 1.5, y el lanzamiento 2 son migraciones a corto y largo plazo respectivamente.

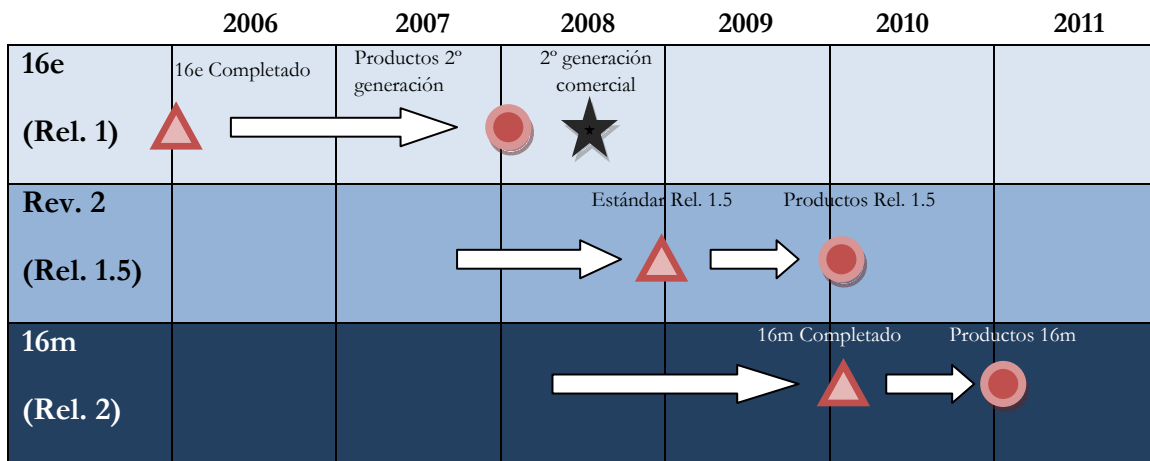


Figura 2- 35: Comercialización de productos y estándares de 802.16m.

En el futuro la demanda de aplicaciones de banda ancha inalámbrica crecerá: streaming de audio y vídeo, servicios de descarga en tiempo real, acceso a Internet a gran velocidad, VoIP... También los nuevos dispositivos móviles, teléfonos de última generación, PDAs, ordenadores personales... están preparados para proporcionar los servicios mencionados. WiMAX es una de las soluciones inalámbricas que puede satisfacer la mencionada demanda.

La misma red desplegada WiMAX se puede utilizar para diferentes propósitos: red troncal inalámbrica para los WiFi hotspots³⁶, acceso fijo/nómada a los equipos locales de cliente y a las

³⁶ Un hotspot es una zona de cobertura Wi-Fi, en el que un punto de acceso o varios proveen servicios de red a través de un Proveedor de Servicios de Internet Inalámbrico (WISP). Este servicio permite mantenerse conectado a Internet en lugares públicos. Este servicio puede brindarse de manera gratuita o pagando una cantidad que depende del proveedor. Los dispositivos compatibles con Wi-Fi y acceso inalámbrico permiten conectar PDAs, ordenadores y teléfonos móviles, entre otros.

pasarelas residenciales, acceso móvil a ordenadores portátiles, teléfonos inteligentes (*smartphones*), dispositivos de alta movilidad... Todos estos distintos usos se ilustran en la Ilustración 2-37.

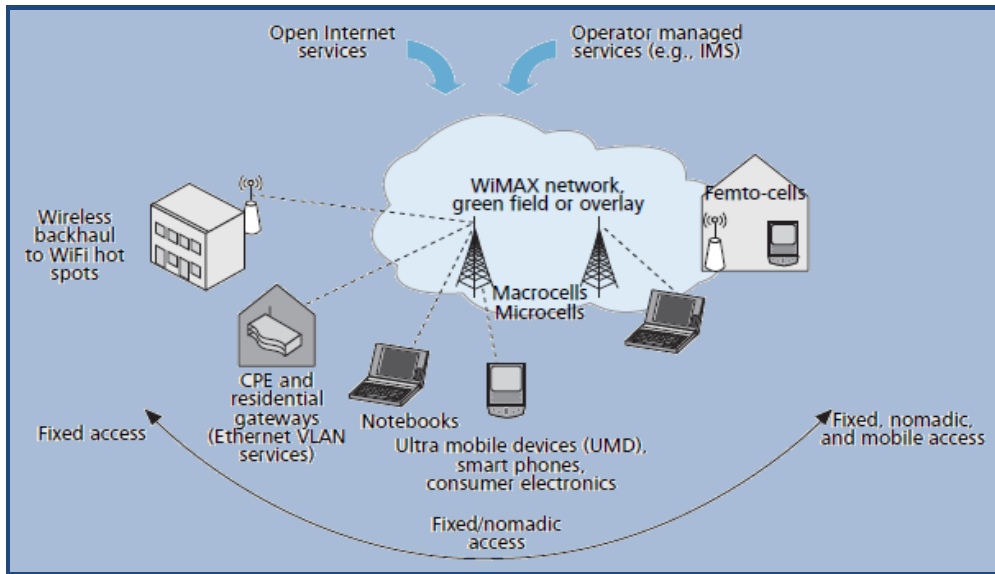


Figura 2- 36: Mobile WiMAX posibilita diferentes formas de conexión en una misma red.

Las previsiones del crecimiento de WiMAX asumen un modelo de red similar al de las redes de banda ancha ya que se asume que en las conexiones fijas de WiMAX por cada equipo local de cliente (CPE) existen múltiples usuarios conectados con distintas aplicaciones/ usos mientras que WiMAX móvil está más orientado a un único usuario por conexión. Por lo tanto el número de usuarios siempre es superior al número de abonados. En la Figura 2-38 se exhibe la previsión de usuarios de WiMAX por regiones desde el año 2007 al 2012.

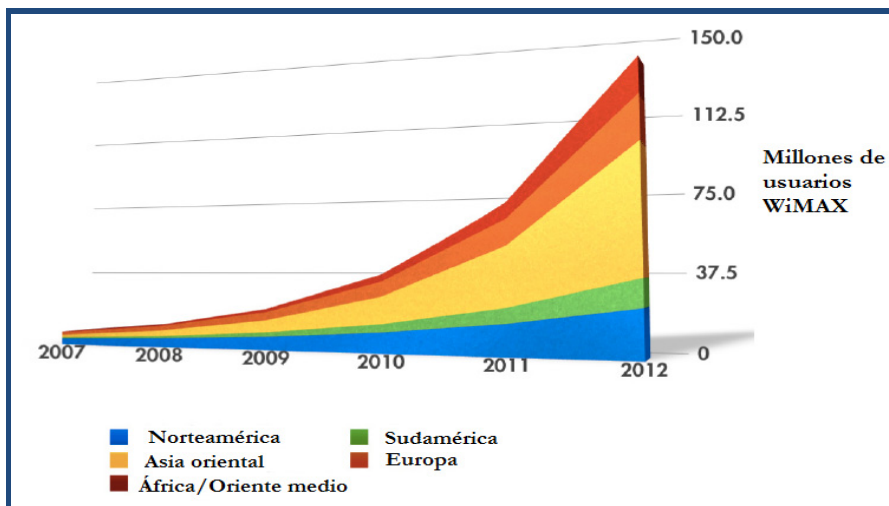


Figura 2- 37: Previsión de usuarios de WiMAX por región (2007-2012).

Teniendo en cuenta sólo WiMAX *Mobile*, las posibles previsiones³⁷ de usuarios son menos optimistas que las anteriores ya que la disponibilidad del espectro de radiofrecuencia adecuado es un factor limitante de su crecimiento y proliferación. En la gráfica 2-39 se puede apreciar las previsiones de abonados de WiMAX móvil dividido por regiones.

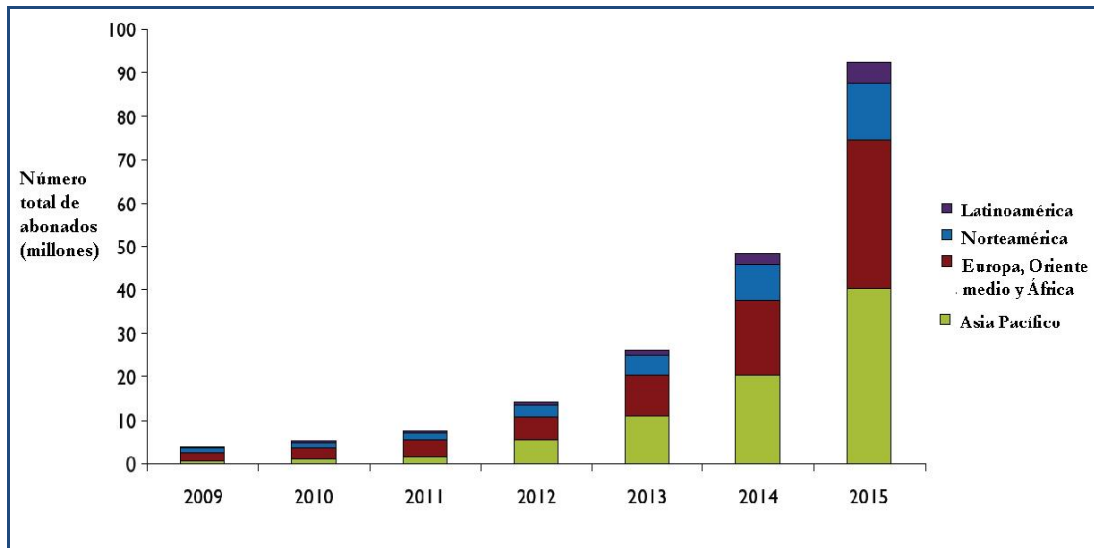


Figura 2- 38: Previsiones del número de abonados de WiMAX *Mobile* (2009-2015).

2.9. Ventajas de WIMAX.

Entre otras ventajas se incluyen las siguientes:

- Despliegue rápido, incluso en zonas donde una infraestructura cableada no tiene fácil acceso.
- Facilidad para vencer las limitaciones físicas de la infraestructura tradicional cableada. Costes de instalación razonables para soportar unas tasas de acceso altas.
- Arquitectura flexible.
- Gran área de movilidad y cobertura mundial.
- Interoperabilidad de los equipos.
- Tolerancia al multitrayecto y a la interferencia cocanal gracias a la ortogonalidad en los subcanales tanto para el enlace ascendente y descendente.
- Ancho de banda de canal escalable desde 1,25 a 20 MHz.

³⁷ Fuente: Yankee Group, 2009.

- Dúplex por división en el tiempo se usa para los perfiles de WiMAX por su eficiencia para soportar tráfico asimétrico, reciprocidad de canal y sistemas de antenas avanzados.
- *Hybrid-Automatic Repeat Request* (H-ARQ) provee robustez con adaptación rápida a las condiciones del canal en escenarios con alta movilidad.
- Planificación selectiva por frecuencia y subcanalización con opciones múltiples de permutación que proporciona a WiMAX la habilidad de optimizar la calidad de la conexión basada en la potencia de las señales de los usuarios específicos.
- Reducción del consumo de batería en los dispositivos móviles en los modos de espera y desocupado.
- Cambio de estación base optimizado para minimizar la sobrecarga y conseguir un retardo menor de 50 milisegundos.
- La reutilización de frecuencias controla la interferencia co-canal para soportar reutilización de frecuencias universal con la mínima degradación en la eficiencia espectral.
- Amplio rango de sistemas de antenas avanzado incluyendo conformación de haz³⁸, codificación espacio-tiempo y multiplexación espacial.

2.10. Aplicaciones de WiMAX.

Las aplicaciones de acceso basadas en topología de punto multipunto incluyen:

- 1.-** Infraestructura celular (backhaul³⁹).
- 2.-** Ancho de banda bajo demanda.
- 3.-** Ancho de banda residencial.
- 4.-** Servicios inalámbricos nómadas.

Existen pocos productos comerciales de WiMAX en la actualidad, siendo propietarios muchos de los que están disponibles en el mercado. Las primeras certificaciones de productos WiMAX tuvieron lugar en 2006. Más, muchos terminales en venta se ofrecen como compatibles con la tecnología 802.16.

³⁸ Un formador de haz (o beamformer) es un filtro espacial que opera en la salida de un array de sensores o transmisores con el objetivo de mejorar la amplitud de un frente de ondas coherente en relación al ruido de fondo. Esta mejora se basa en el carácter directivo de la señal, concentrando la mayor parte de la energía de la misma en una dirección. Esta dirección de apuntamiento recibe el nombre de Maximum Response Angle (MRA), que puede ser seleccionado por el usuario.

³⁹ Backhaul se refiere a la conexión de baja, media o alta velocidad que conecta a ordenadores u otros equipos de telecomunicaciones encargados de transmitir la información. Los backhails conectan redes de datos, redes de telefonía celular. Se usan para interconectar redes entre sí utilizando diferentes tipos de tecnologías cableadas o inalámbricas.

El estándar WiMAX se ha desarrollado para dar cabida a un amplio abanico de aplicaciones para el usuario. A continuación se muestra una tabla con las aplicaciones más destacadas:

Aplicación	En Tiempo real?	Tipo de aplicación	Ancho de banda
Juegos interactivos	Yes	Interactive Gaming	50 - 85 kbps
VoIP, Videoconferencia	Yes	VoIP	4 - 64 kbps
		Video Phone	32 - 384 kbps
Streaming Media	Yes	Music/Speech	5 - 128 kbps
		Video Clips	20 - 384 kbps
		Movies Streaming	> 2 Mbps
Tecnologías de la Información	No	Instant Messaging	< 250 byte messages
		Web Browsing	> 500 kbps
		Email (with attachments)	> 500 kbps
Descarga de contenido multimedia	No	Bulk Data, Movie Download	> 1 Mbps
		Peer-to-Peer	> 500 kbps

Tabla 2- 10: Aplicaciones de WiMAX.

La tecnología WiMAX dispone de suficiente ancho de banda y herramientas avanzadas de control de tráfico de red para permitir aplicaciones que requieran tráfico con prioridades, grandes anchos de banda y/o gran capacidad de datos. Un informe reciente⁴⁰ prevé que para finales del año 2014 existirán más de 20 millones de conexiones WiMAX en todo el mundo, como se puede comprobar en la gráfica 2-40.

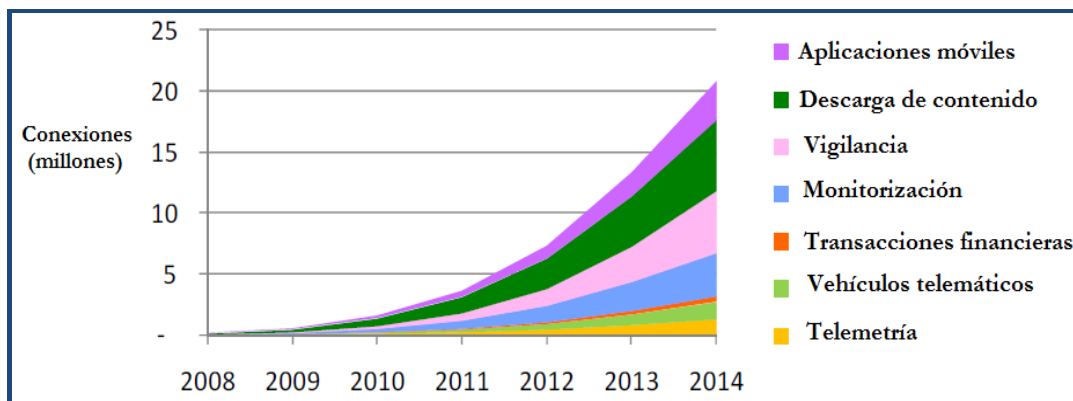


Figura 2- 39: Conexiones WiMAX en las distintas aplicaciones (2008-2014).

⁴⁰ Fuente: Senza Fili Consulting, 2008.

Capítulo 3

Diseño, Simulaciones y Resultados.

3.1 Simulaciones de un sistema WiMAX multiceldas utilizando clúster de 7 celdas para la banda de 3.5 GHz para usuarios en un edificio con la señal y las interferencias atravesando la fachada del edificio.

La simulación en Matlab de este proyecto fin de carrera se ha enfocado al estudio de sistemas WiMAX multiceldas utilizando la topología con *clusters* (agrupaciones, en español) compuestos por 7 celdas. La banda de frecuencia de uso será 3.5 GHz aplicada sobre el modelo de cálculo de pérdidas de propagación de Erceg. De esta forma, el uso del cálculo del enlace⁴¹ (*link budget*) permite contemplar variables tales como la potencia transmitida, las ganancias y las pérdidas de los sistemas radiantes. En definitiva, partiendo de la premisa de que la potencia recibida debe ser siempre mayor que la sensibilidad del equipo receptor, se podrá conocer la cobertura de cada celda y así poder dimensionar la red. En su aplicación a escenarios multiceldas se añaden representaciones de la variación de la SINR en cada punto de cobertura junto con gráficas de la tasa binaria real de bajada.

Como mencionamos al inicio del proyecto, existen dos tipos de usuarios del servicio WiMAX: usuarios indoor (portátil), refiriéndonos a aquellos usuarios que acceden al servicio a través de su ordenador de sobremesa o portátil con una tarjeta WiMAX en el interior del edificio (indoor) y cuya velocidad es muy reducida aunque disfrutan de portabilidad, y los usuarios móviles, usuarios que acceden al servicio WiMAX a través de un dispositivo móvil compatible con WiMAX encontrándose en el interior de un vehículo (automóvil, transporte público...). Las simulaciones de los apartados 3.1 y 3.3 se corresponden con los usuarios indoor portátil mientras que las del epígrafe 3.2 están orientadas a usuarios móviles.

A continuación, de forma detallada, se desglosan distintos fundamentos que se han utilizado para componer el protocolo inalámbrico utilizado en las simulaciones.

⁴¹El cálculo del enlace (en inglés *link budget*) es la suma de todas las ganancias y pérdidas desde el transmisor, a través del medio (espacio libre, cable, guía de onda, fibra, etc.) hasta el receptor en un sistema de telecomunicaciones. Tiene en cuenta tanto la atenuación de la señal transmitida debido a las pérdidas de propagación, como las ganancias de las antenas, línea de alimentación y las distintas pérdidas.

a) Modelo de Propagación Erceg.

Este modelo usó los datos experimentales recogidos por los servicios inalámbrico de AT&T en 95 macroceldas operando a la frecuencia de 1.9 GHz existentes a lo largo del país de Estados Unidos. Los valores obtenidos para la ciudad de Seattle se exponen en la Figura 3-1.

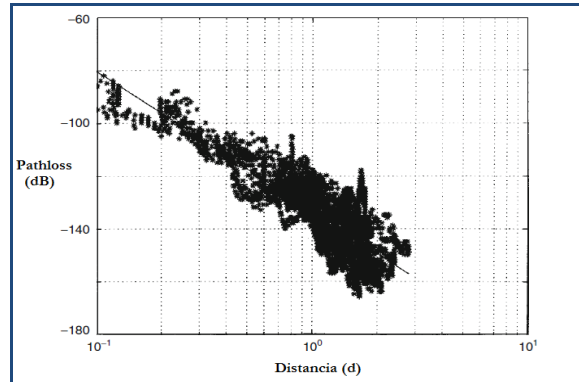


Figura 3- 1: Valores experimentales obtenidos en la ciudad de Seattle.

Este modelo fue adoptado por el grupo de trabajo IEEE 802.16 como el modelo recomendado para aplicaciones WiMAX fijas.

El modelo propone tres tipos de escenarios geográficos diferentes (Tabla 3-1):

- Erceg A: Aplicable a terrenos montañosos con mediana/alta densidad de árboles y zonas urbanas.
- Erceg B: Aplicable a terrenos montañosos con baja densidad de árboles o a terrenos llanos con moderada/alta densidad de árboles y zonas suburbanas.
- Erceg C: Aplicable a terrenos llanos con baja densidad de árboles y zonas rurales.

El modelo introduce la pérdida en unidades logarítmicas (dB) como:

$$PL = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} (d/d_o) + X_{shad} \quad d \geq d_o \tag{3.1}$$

Dónde γ es el exponente de pérdida de propagación, $d_o = 100$ m es la distancia de referencia, X_{shad} es el valor de desvanecimiento por sombra (shadowing) que en nuestra simulación tiene el valor de 10 dB y A está dada por la atenuación por espacio libre:

$$A \text{ (dB)} = 20 \cdot \log_{10} (4\pi \cdot d_o / \lambda) \tag{3.2}$$

Dónde f es la frecuencia de operación en Hz, $c = 299.792.458$ m/s es la velocidad de propagación de la luz en el vacío y d es la distancia en metros entre la BS (estación base) y la SS (estación receptora).

El exponente de pérdida de propagación o factor de atenuación γ se expresa como sigue:

$$\gamma = a - b \cdot h_t + c/h_t \quad 10 \text{ m} \geq h_t \geq 80 \text{ m} \quad (3.3)$$

Dónde h_t es la altura de la estación base. Los valores de **a**, **b** y **c** vienen dados por el modelo y se resumen en la Tabla 3-1:

Parámetro del modelo	Terreno tipo A	Terreno tipo B	Terreno tipo C
a	4.6	4.0	3.6
b	0.0075	0.0065	0.0050
c	12.6	17.1	20.0

Tabla 3- 1: Escenarios de Aplicación del Modelo de Propagación Erceg.

Ahora bien, estrictamente hablando, este modelo es válido para frecuencias cercanas a 1.900 MHz, para un SS con antenas instaladas a 2 metros y una altura de antena de BS que puede variar de 10 a 80 metros. El modelo ha sido extendido mediante factores de corrección para cubrir mayores frecuencias y diferentes alturas de antenas de SS. La versión extendida del modelo de Erceg es válida para el siguiente rango de parámetros:

- $1.900 \leq f \leq 3.500$ MHz
- $10 \leq h_{bs} \leq 80$ m
- $2 \leq h_{ss} \leq 10$ m
- $100 \leq d \leq 8.000$ m

La fórmula de atenuación para la versión extendida del modelo de Erceg se expresa como:

$$P_L = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} (d/d_0) + X_f + X_{ss} + X_{shad} \quad (3.4)$$

Donde:

- X_f es el factor de corrección de frecuencia:

$$X_f = 6 \log_{10} \left(\frac{f}{1.900} \right) \quad (3.5)$$

Siendo **f** la frecuencia de operación en MHz.

- X_{ss} es el factor de corrección de altura de la SS:

$$X_{ss} = -10,8 \log_{10} \left(\frac{h_{ss}}{2} \right) \quad \text{Para los terrenos a y b.} \quad (3.6)$$

$$X_{ss} = -20 \log_{10} \left(\frac{h_{ss}}{2} \right) \quad \text{Para los terrenos tipo c.} \quad (3.7)$$

Y, finalmente, X_{shad} es el factor de desviación de distribución log-normal que tiene en cuenta la pérdida por shadowing debido a árboles y otras interferencias. El rango de valores que puede adoptar oscila entre 8,2 dB y 10,6 dB, en nuestra simulación toma el valor de 10 dB.

En el Anexo A, Extensión del modelo de propagación, se puede analizar cómo proceder con alturas de estación suscriptoras superiores a 10 metros.

b) Cálculo del enlace (*Link Budget*).

Un concepto fundamental en el diseño de la simulación WiMAX ha sido la caracterización del cálculo del enlace (*link budget*), es decir, la suma de todas las ganancias y pérdidas en un sistema de comunicaciones. El resultado del link budget para enlaces punto a punto aporta la potencia de transmisión necesaria para lograr un nivel de señal en el receptor con una tasa de señal/ruido (SINR) dada, a una BER⁴² determinada.

Para este caso de análisis punto-multipunto, ver Figura 3-2, la potencia de transmisión es un dato conocido y será la máxima permitida. Por lo tanto, del link budget resultará la distancia máxima que se puede alcanzar, logrando un nivel de señal que esté por arriba de la sensibilidad del receptor, a una tasa de transmisión deseada. La modulación adaptativa permite compensar velocidad de transmisión por robustez, dependiendo de la distancia y condiciones del canal en nuestro escenario punto-multipunto.

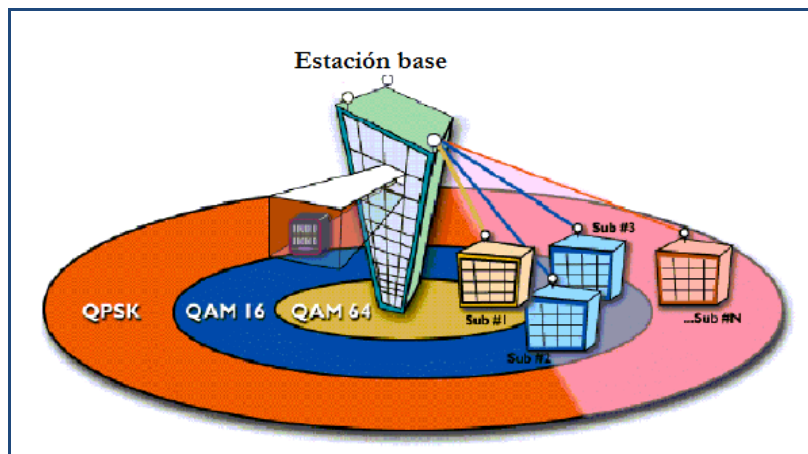


Figura 3- 2: Esquema gráfico de la modulación adaptativa en nuestro escenario punto-multipunto simulado.

⁴² Bit Error Ratio (BER) es, en telecomunicaciones, el número de bits o bloques incorrectamente recibidos, con respecto al total de bits o bloques enviados durante un intervalo especificado de tiempo.

Para cualquier protocolo inalámbrico, es suficiente considerar factores tales como el path loss (pérdida por trayectoria), márgenes, sensibilidad del receptor y ganancias y pérdidas de las antenas. De esta forma el link budget básicamente añade todas las ganancias y pérdidas a la potencia transmitida (dB), a fin de conocer la potencia recibida.

En definitiva, el cálculo de la SINR para un sistema multiceldas queda reflejado en la Tabla 3-2:

SINR	Ámbito de aplicación
$SINR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{n} \right)$	Sistema sin interferencias (máximo 7 celdas)
$SINR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{n + i_1} \right)$	Sistema con una interferencia (máximo 14 celdas)
$SINR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{n + i_1 + i_2} \right)$	Sistema con dos interferencias (máximo 21 celdas)
$SINR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{n + i_1 + i_2 + i_3} \right)$	Sistema con tres interferencias (máximo 28 celdas)
$SINR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{n + \sum_{k=1}^4 i_k} \right)$	Sistema con cuatro interferencias (máximo 35 celdas)
$SINR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{n + \sum_{k=1}^5 i_k} \right)$	Sistema con cinco interferencias (máximo 42 celdas)
$SINR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{n + 1.05 \cdot \sum_{k=1}^6 i_k} \right)$	Sistema con seis interferencias (máximo 49 celdas)
$SINR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{n + 1.1 \cdot \sum_{k=1}^6 i_k} \right)$	Sistema con múltiples interferencias (máximo > 56 celdas)

Tabla 3- 2: Relación Señal a Ruido e Interferencias (SINR) para diferentes sistemas WiMAX.

Las gráficas de SINR mostradas en este capítulo se corresponden con los siguientes valores siguiendo la Tabla 2-6 del capítulo 2:

- Mínimo valor de SINR para obtener la mayor modulación posible (64QAM) que equivale a 24,4 dB.
- Mínimo valor de SINR para obtener la menor modulación posible (BPSK) que se corresponde con 6,4 dB.
- Valor medio de SINR, aproximadamente 12 dB.

En las fórmulas de la Tabla 3-2, **N** es la potencia de ruido neta expresada por:

$$N = -114 + 10 \cdot \log_{10} (BW) + NF \quad (3.8)$$

Siendo **BW** el ancho de banda en MHz, **NF** el factor de ruido y **s** la señal deseada en unidades naturales.

La señal deseada **S** en unidades logarítmicas, **s** en unidades naturales, viene dada por la siguiente fórmula:

$$S \text{ (dB)} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - PL \quad (3.9)$$

Con:

P_{tx} es la potencia de salida del transmisor máxima permitida por la regulación internacional para la banda de frecuencia adoptada.

G_{tx} y **G_{rx}** son la ganancia máxima de transmisión y recepción respectivamente.

PL corresponde al *path loss*, que resulta de la suma de las pérdidas de propagación por efecto de la distancia según el modelo de Erceg **P_{Erceg}**, las pérdidas del desvanecimiento por sombra (*shadowing*) **X_{shad}** cuyo valor son 10 dB, las pérdidas por penetración en interiores (inserción) **L_{in}** valor establecido en 10 dB y las pérdidas por multitrayecto en el edificio (multipath) **M** estimadas en 10 dB.

$$PL = P_{Erceg} + X_{shad} + L_{in} + M \quad (3.10)$$

c) Cálculo de la ganancia de la antena transmisora.

En la simulación, las antenas transmisoras de la estación base son direccionales y su ganancia depende de la anchura de haz y del ángulo que forma con la antena receptora. La fórmula para calcular dicha ganancia, **G_{tx}**, es la siguiente:

$$G_{tx} = \text{máximo} \left(G_{tx \text{ max}} - 12 \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, G_{tx \text{ min}} \right) \quad (3.11)$$

Dónde **G_{tx max}** depende de la anchura de haz de la antena y viene expresado en la Tabla 3-3, **θ** es el ángulo que forma la antena transmisora con la antena receptora, **θ_{3dB}** es la anchura de haz de la antena transmisora y **G_{tx min}** es un valor establecido a -5 dB.

Anchura de haz de la antena θ_{3dB} (°)	Ganancia máxima de transmisión $G_{tx\ min}$ (dB)
60	17,5
90	16
120	15

Tabla 3- 3: Ganancia máxima de transmisión dependiendo de la anchura de haz de la antena.

d) Cálculo de las múltiples interferencias cocanal.

Como hemos descrito en el apartado 3.b. nuestro sistema WiMAX es un sistema con clústeres de siete celdas con múltiples interferencias cocanal. En la simulación como es imposible calcularlas todas realizamos una aproximación calculando las cinco señales interferentes que afectan a la señal deseada tal y como se muestran numeradas en la Figura 3-3.

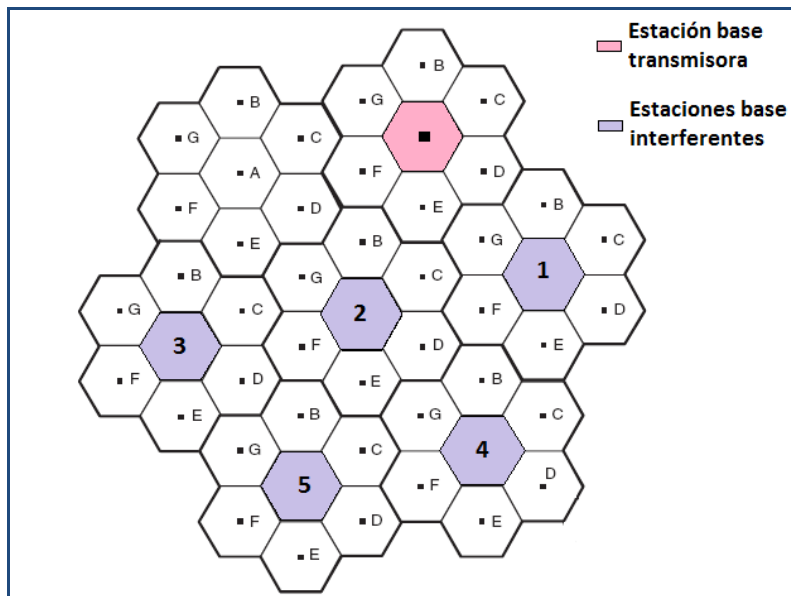


Figura 3- 3: Esquema del sistema celular para el cálculo de las interferencias cocanal.

Cada una de las interferencias, I_k , se calcularán del mismo modo que calculamos la señal deseada, siguiendo la siguiente fórmula:

$$I_k = P_{tx} + G_{tx, k} + G_{rx} - PL_k \quad k = 1,2,3,4,5 \quad (3.12)$$

Dónde P_{tx} es la potencia de salida del transmisor interferente máxima, que coincide con la potencia de transmisión de la señal deseada, $G_{tx, k}$ es la ganancia de la antenna interferente que se calcula como se ha explicado en el apartado c) en función del ángulo que forman la antenna transmisora de la señal deseada con la antenna interferente, G_{rx} es la ganancia de la antenna de la estación suscriptora y PL_k son las pérdidas de propagación del modelo de Erceg explicadas en el apartado a).

Finalmente utilizamos la fórmula del cálculo de la SINR de la Tabla 3-2 teniendo en cuenta que es un sistema con múltiples interferencias.

$$SINR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{\alpha + 1.1 \cdot \sum_{k=1}^5 I_k} \right) \quad (3.13)$$

3.1.1. Zona urbana.

Según el modelo de Erceg que se explica en el epígrafe 3.1.a. existen tres zonas aplicables a diferentes entornos N-LOS (sin línea de visión directa). En este apartado se muestran las simulaciones obtenidas para terrenos comprendidos en la zona A del modelo, que se corresponde con una zona urbana; el objetivo es buscar resultados en el interior de un edificio de cuatro plantas de altura, intentando asemejarse lo máximo posible a un escenario real donde pueda extrapolarse, en un futuro, a la mayoría de los edificios con los que se pueden encontrar a la hora de realizar un despliegue urbano de la tecnología.

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones para sistemas con múltiples interferencias cocanal para un sector de 120 grados y ancho de banda del canal de 10 MHz; se han realizado para diferentes anchuras de haz de la antenna transmisora, exactamente para 60°, 90° y 120°; y para cada una de las cuatro alturas de las distintas plantas del edificio donde se encuentran las antenas receptoras, concretamente 1, 4, 7 y 10 metros. También se ha modificado la altura de la estación base para cada una de las cuatro alturas de edificio, las gráficas corresponden en todos los casos a valores de 30 metros y 40 metros de la altura de la BS y una potencia máxima de salida del transmisor de 40 dBm. Se incluyen sólo las gráficas correspondientes al mínimo valor de SINR para aplicar la menor modulación posible (BPSK), 6.4 dB, a un valor de SINR medio de 12 dB, así como al mínimo valor de SINR para aplicar la mayor modulación posible (64QAM), 24.4 dB, ver epígrafe 2.4.1.2 dónde se muestra una tabla con dichos valores.

Los usuarios que se encuentren dentro del radio correspondiente a un valor de SINR mayor o igual a 24,4 dB son aquellos usuarios que disfrutarán de la máxima tasa binaria posible también conocidos como “usuarios privilegiados (*deluxe*)”. Sin embargo aquellos usuarios que se encuentren a una distancia del máximo radio posible de celda con una SINR mínima de 6,4 dB tendrán la tasa binaria mínima posible, serán los “usuarios no privilegiados”.

3.1.1.1. Altura de la antena del usuario de 1 metro.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

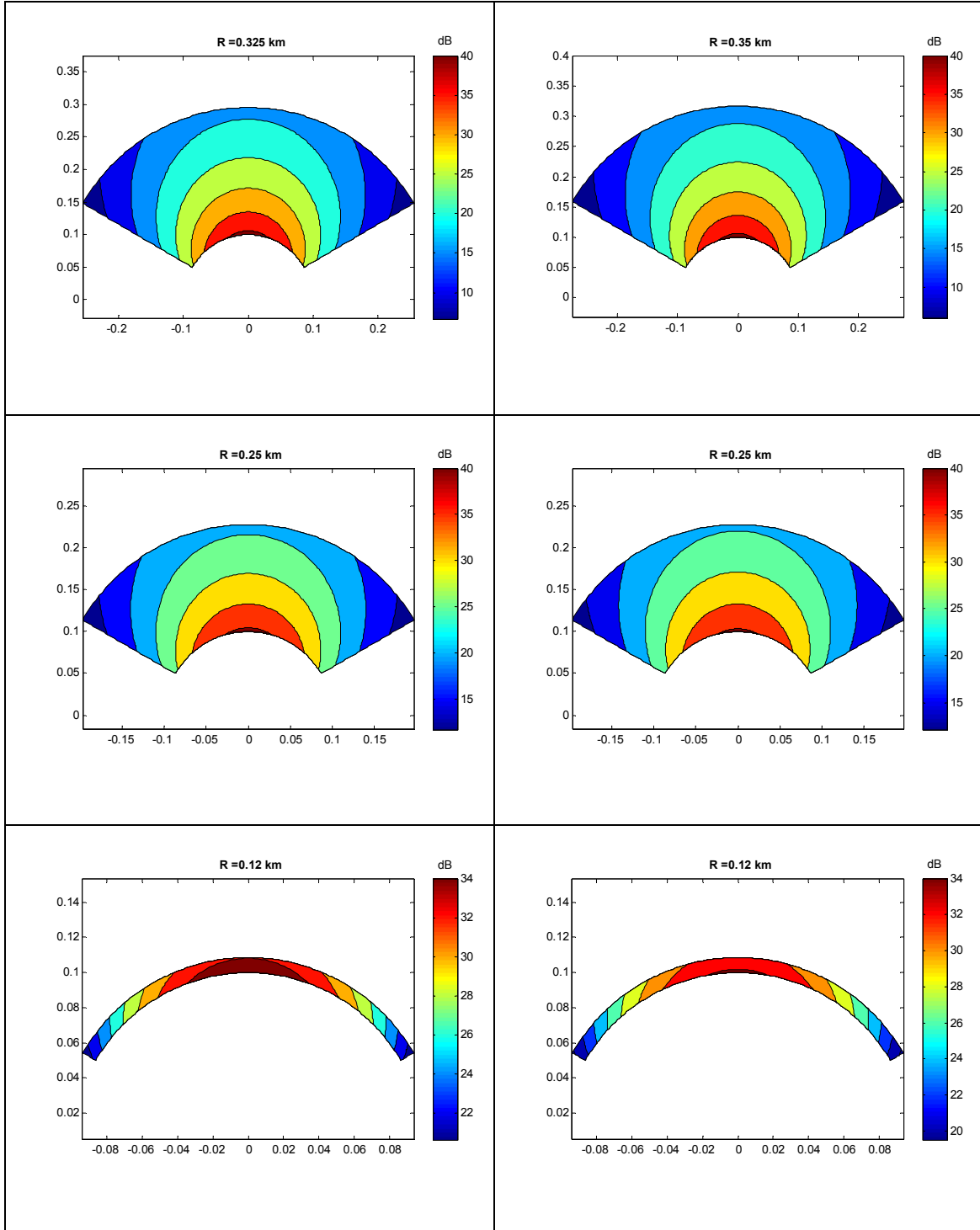


Figura 3- 4: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

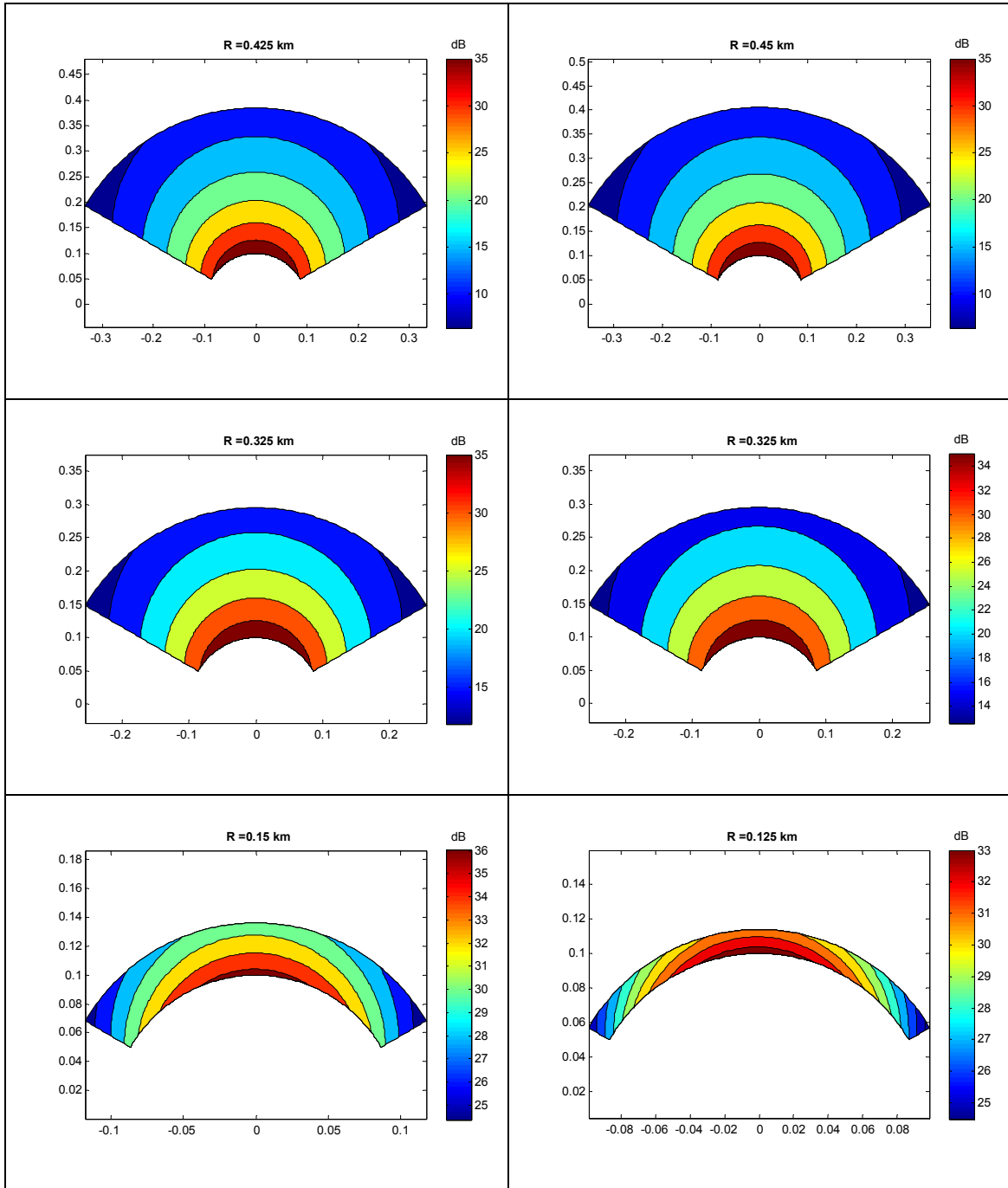


Figura 3- 5: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

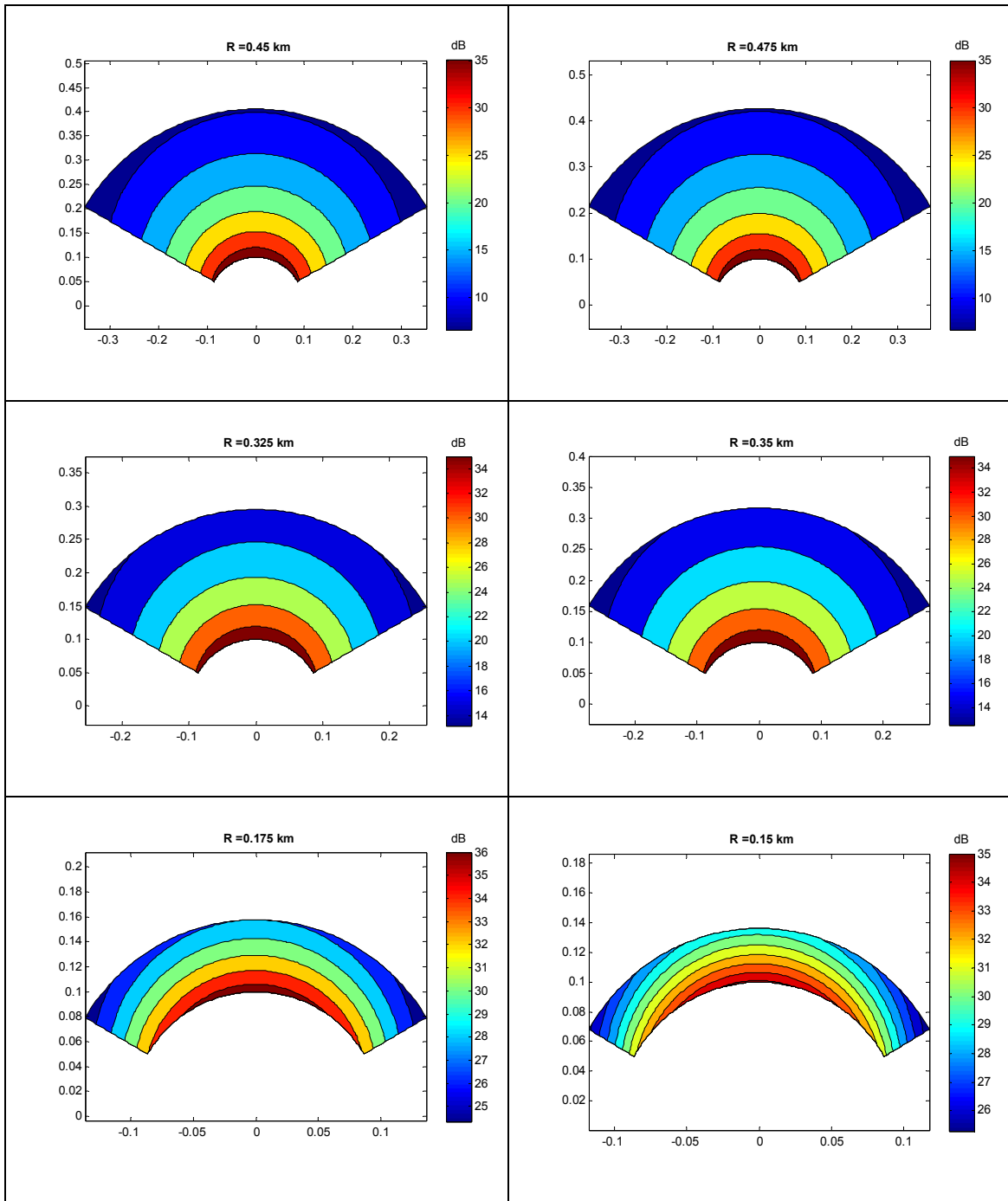


Figura 3- 6: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.1.2. Altura de la antena del usuario de 4 metros.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

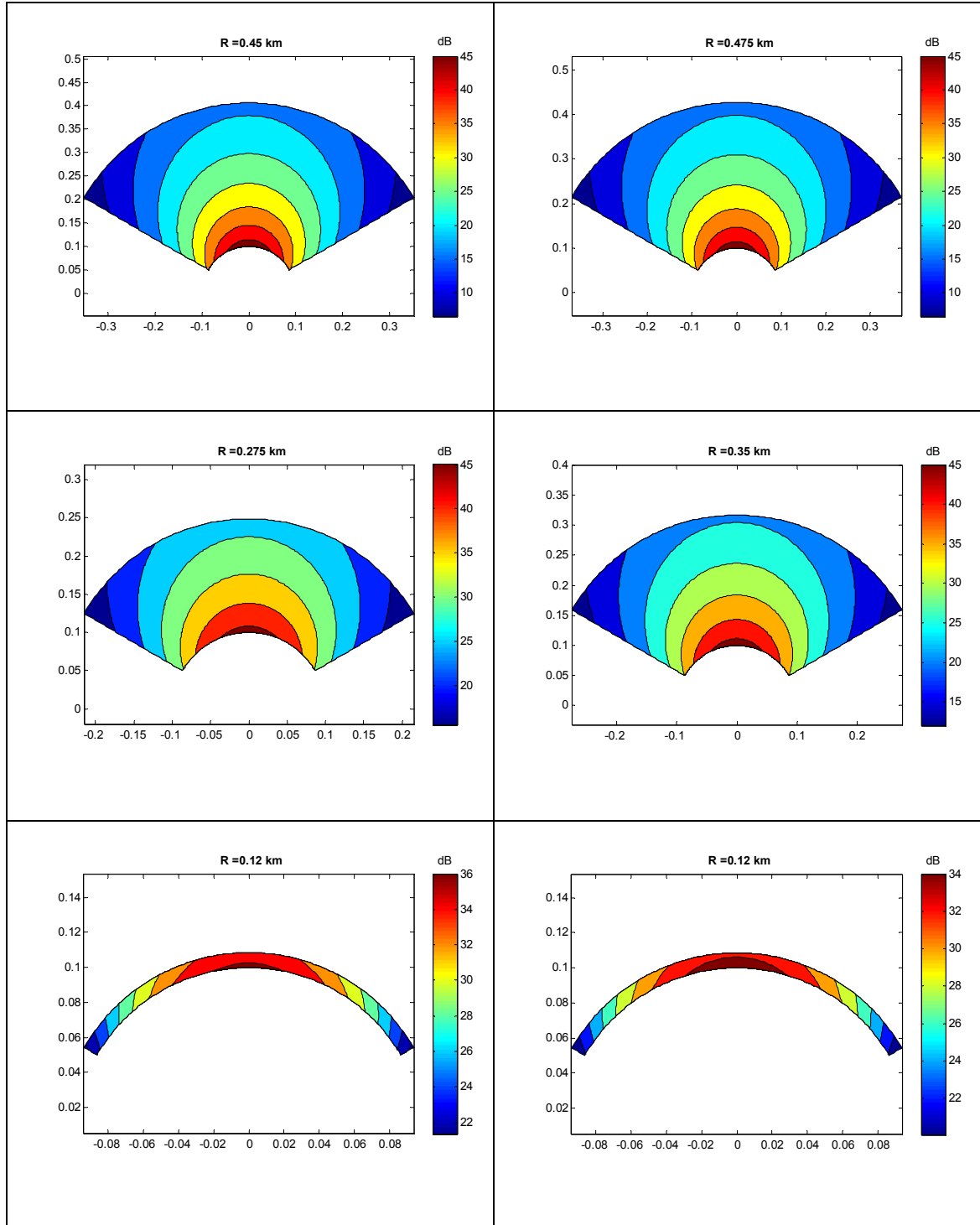


Figura 3- 7: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

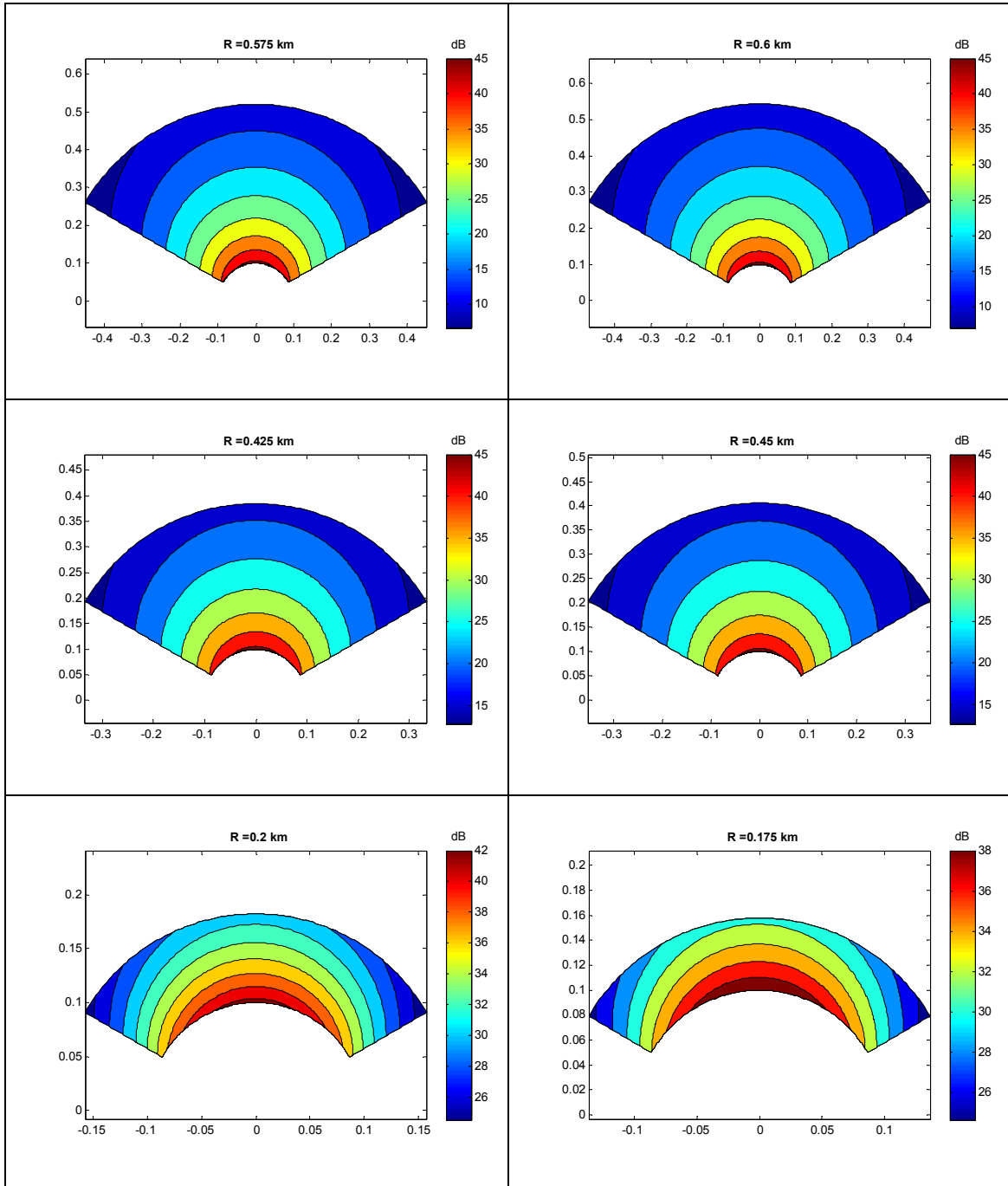


Figura 3- 8: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

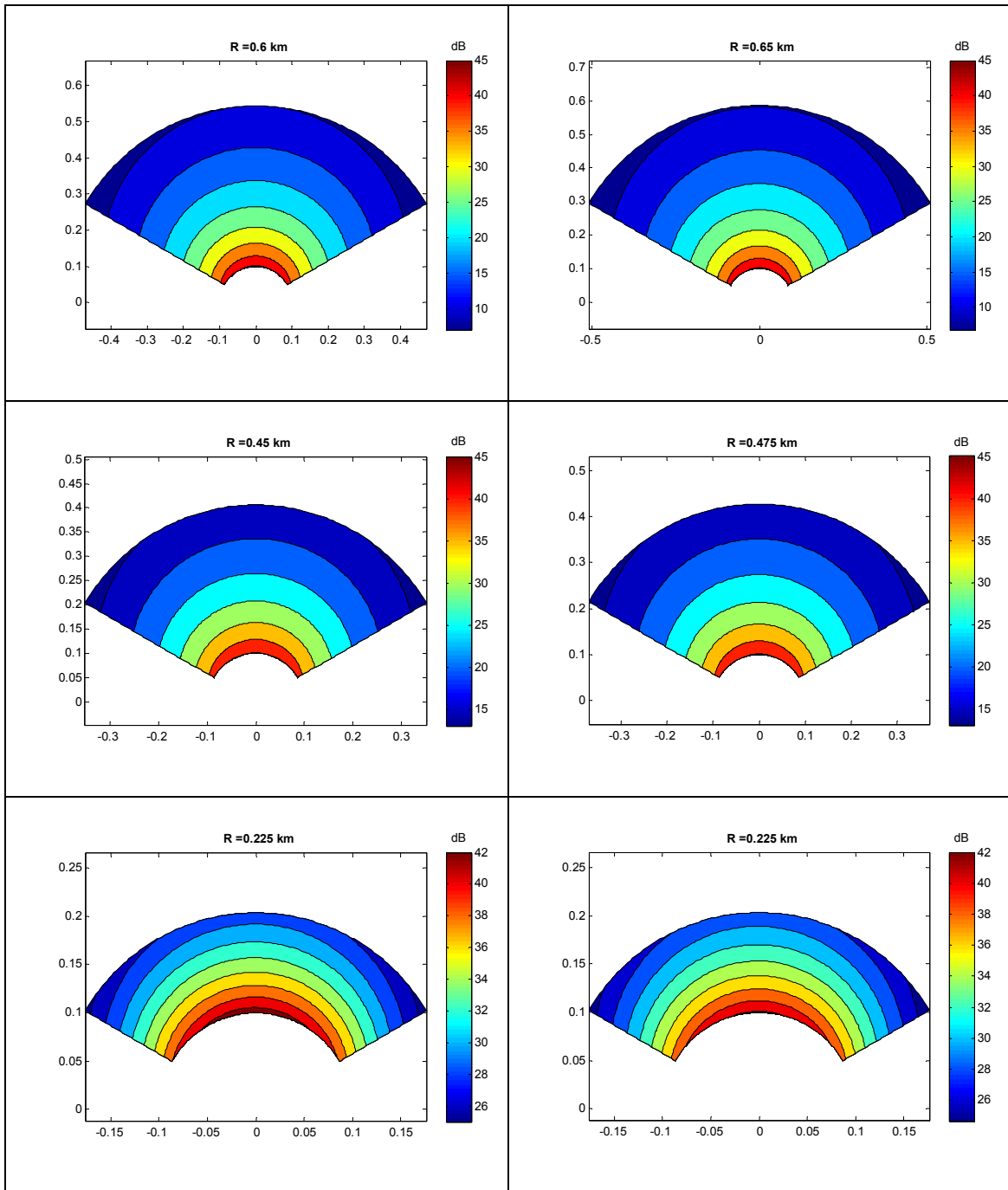


Figura 3- 9: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.1.3. Altura de la antena del usuario de 7 metros.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

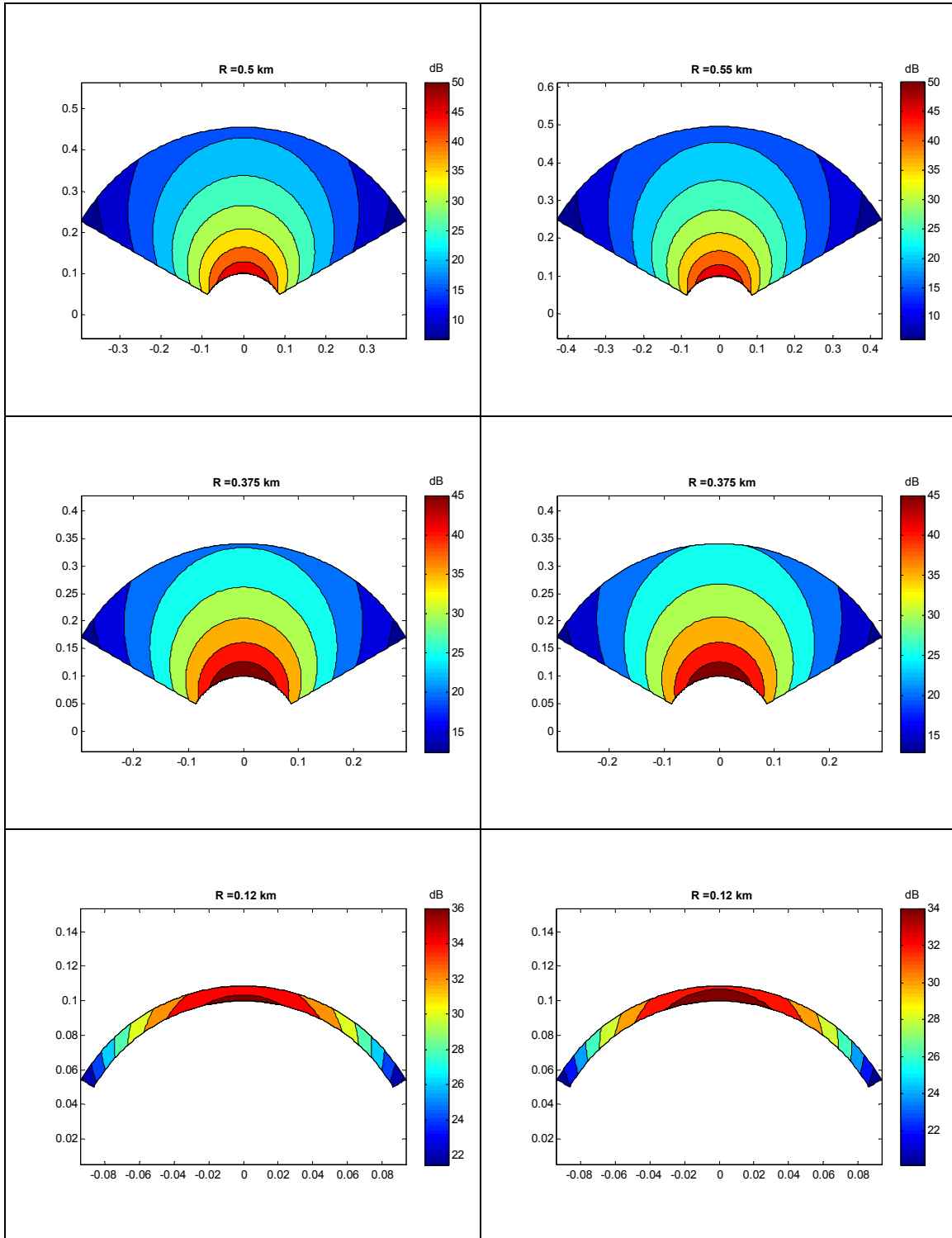


Figura 3- 10: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

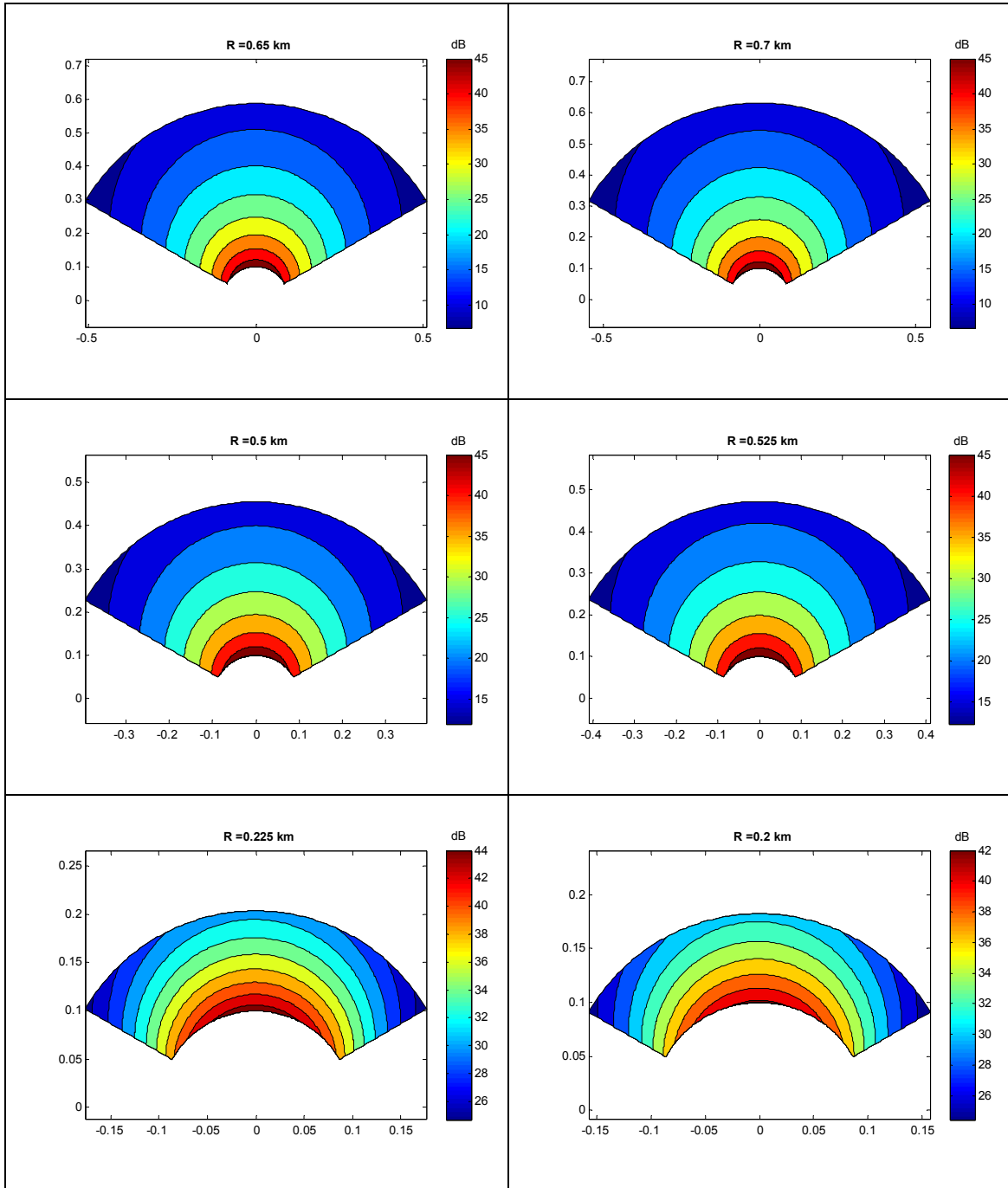


Figura 3- 11: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

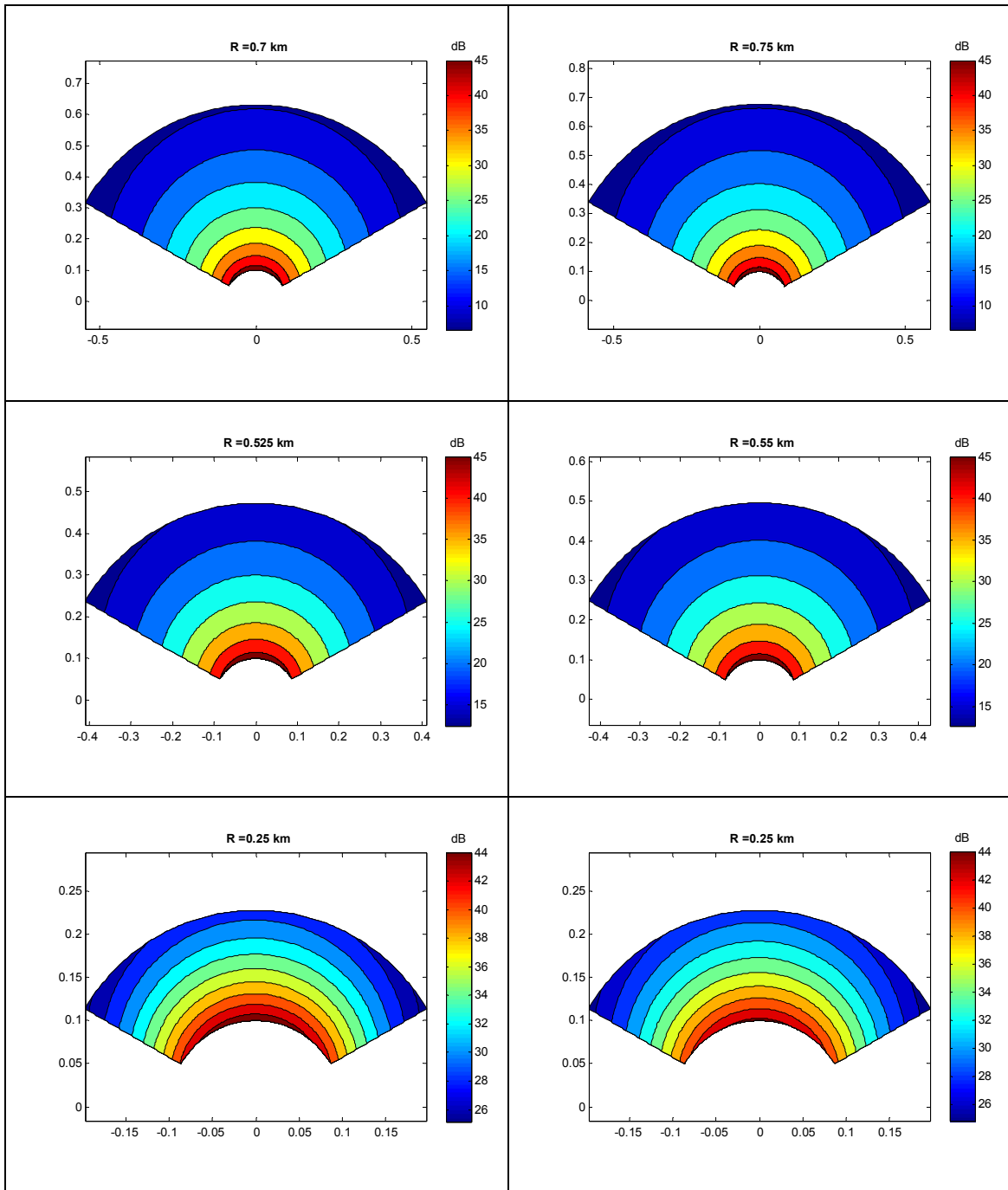


Figura 3- 12: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.1.4. Altura de la antena del usuario de 10 metros.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

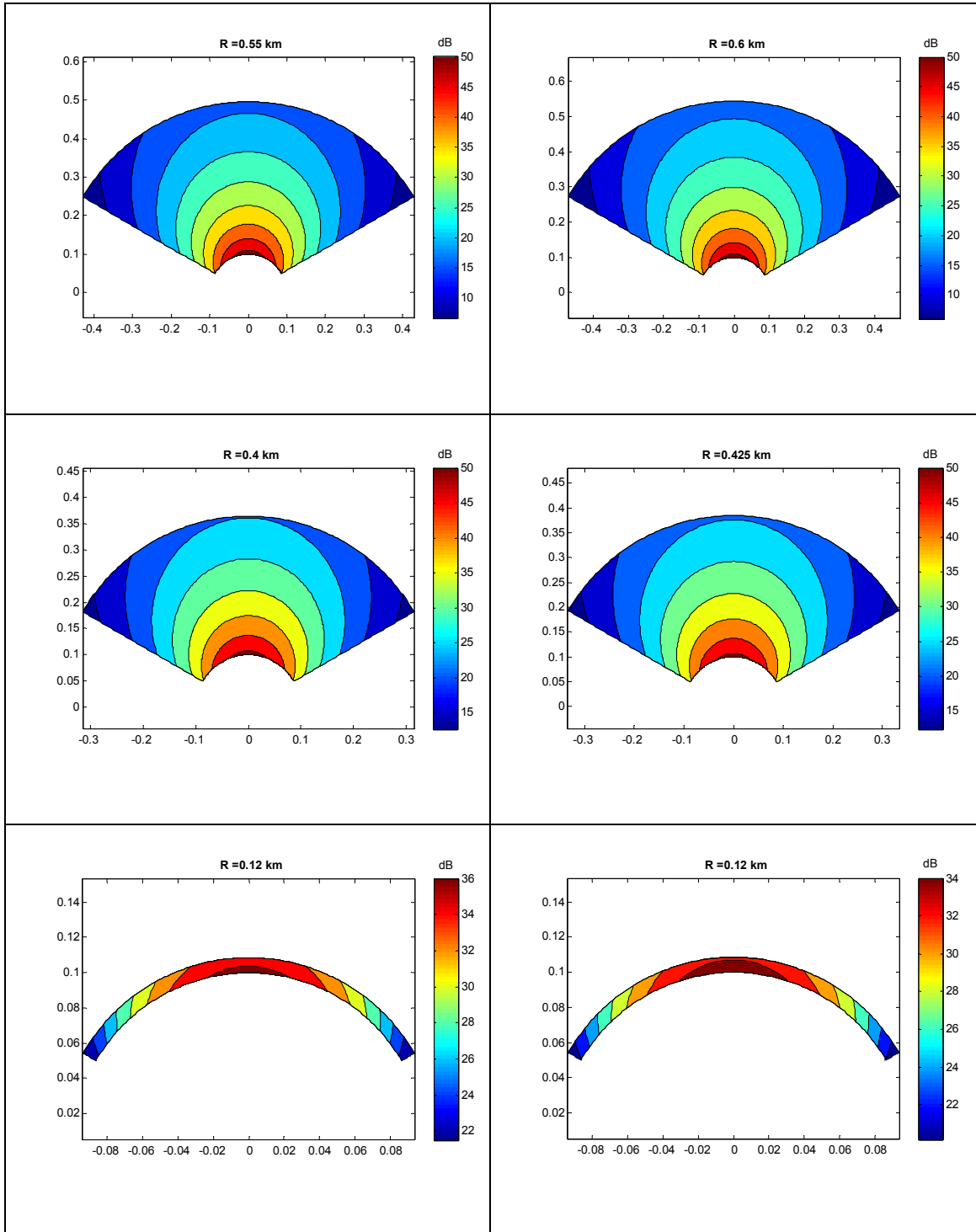


Figura 3- 13: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

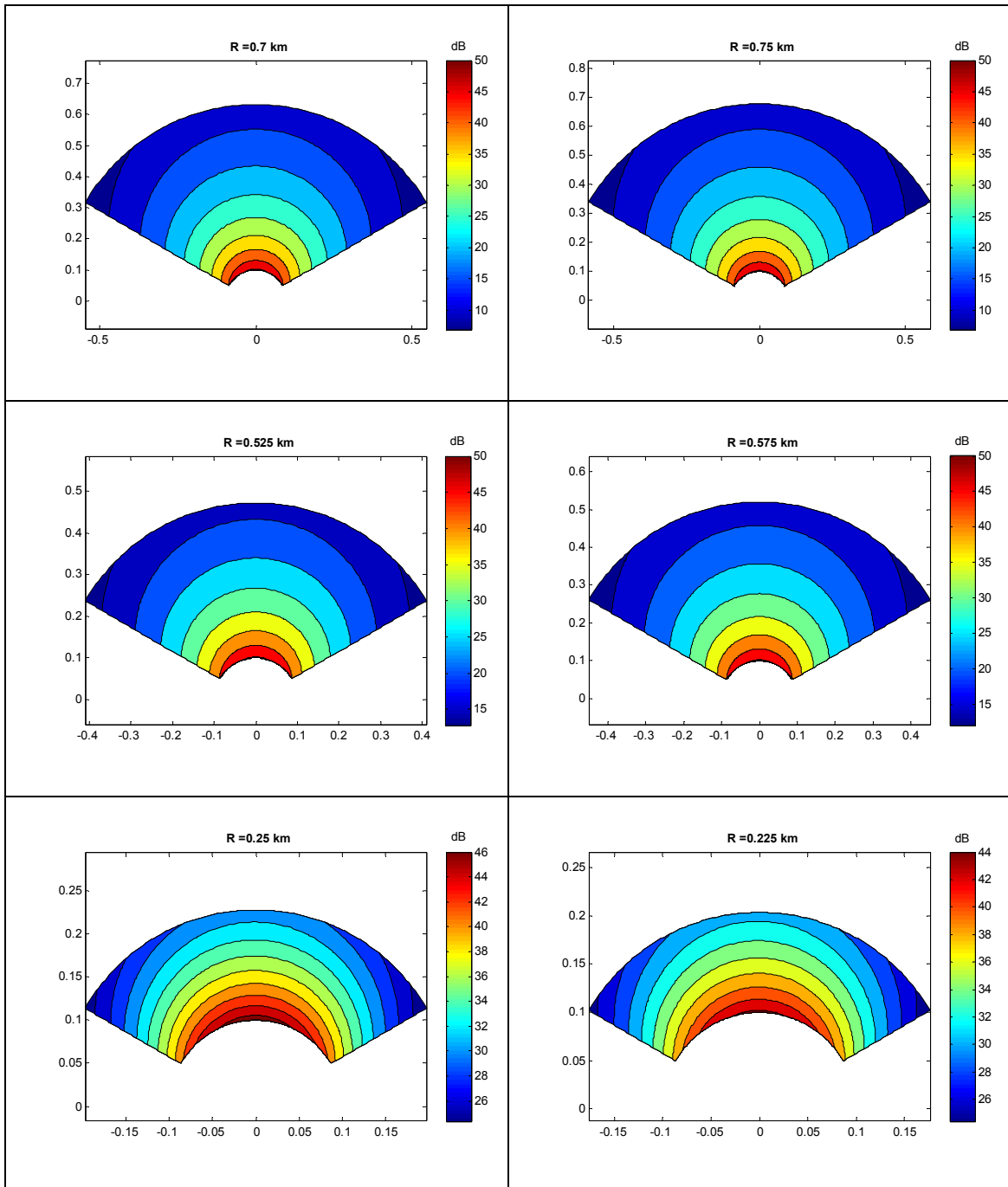


Figura 3- 14: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

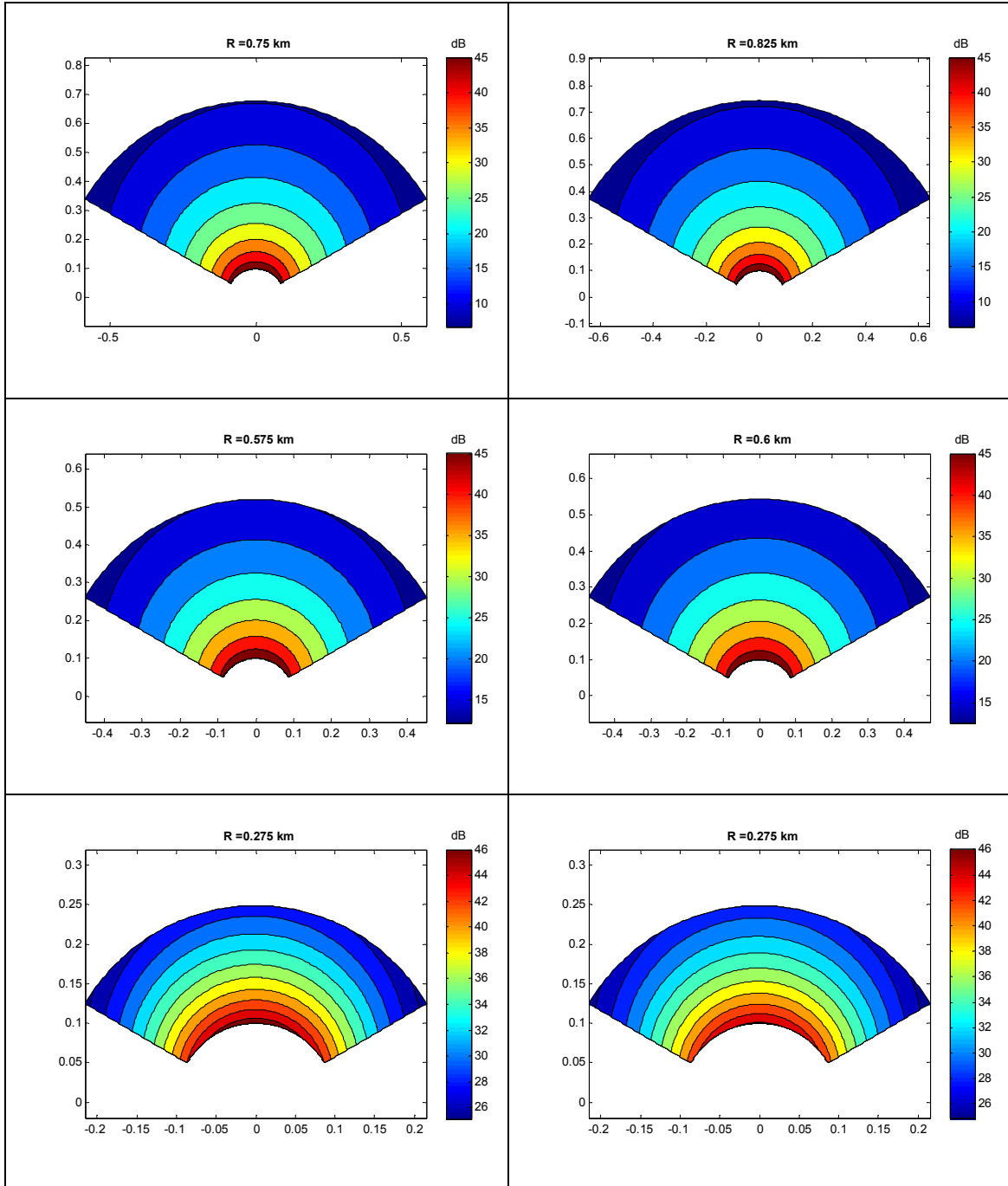


Figura 3- 15: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.1.5. Valor medio de tasa binaria para los usuarios en el edificio.

Para los cálculos de tasa binaria en los tres escenarios: urbano, suburbano y rural, la anchura de banda por sector utilizada en las simulaciones es 10 MHz. En las gráficas que se presentan a continuación el valor de la tasa binaria no es el máximo valor teórico posible ya que existen los siguientes factores que disminuyen la tasa binaria:

- FEC (Forward Error Correction): existen dos valores posibles del factor de corrección de errores $\frac{1}{2}$ ó $\frac{3}{4}$. Ambos dependen del valor de SINR en cada punto de la celda y disminuyen la tasa binaria ya que determinados bits se dedican a corregir errores y no a transmitir información.
- Tiempo dedicado al enlace descendente frente al tiempo total dedicado al enlace ascendente y descendente: este factor de valor 75% disminuye la tasa binaria de descarga del usuario.
- Tiempo de guarda: para evitar la interferencia entre símbolos (ISI) se destina un determinado tiempo sin enviar información de cada periodo de símbolo por lo que la velocidad binaria decrece.
- Portadoras piloto: no todas las portadoras WiMAX son portadoras de información, algunas de ellas conocidas como portadoras piloto no transmiten la señal deseada.

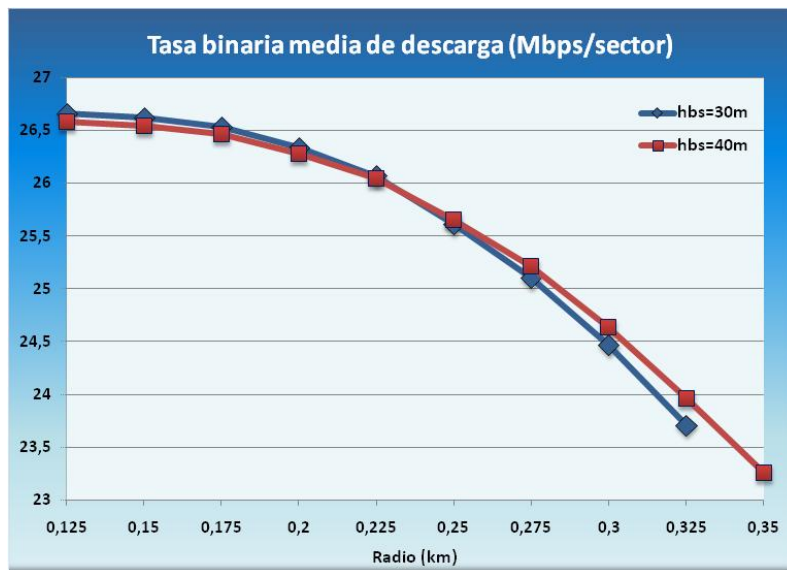


Figura 3- 16: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona urbana con una anchura de haz de 60° .

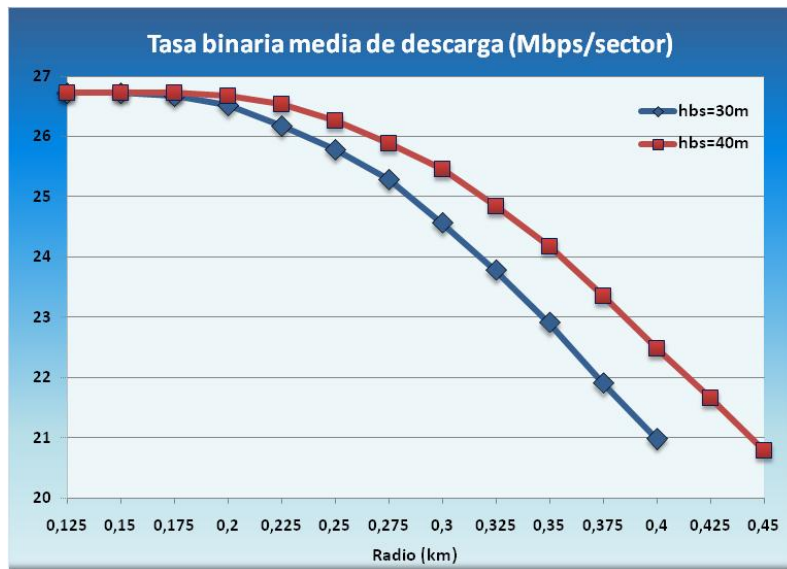


Figura 3- 17: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona urbana con una anchura de haz de 90°.

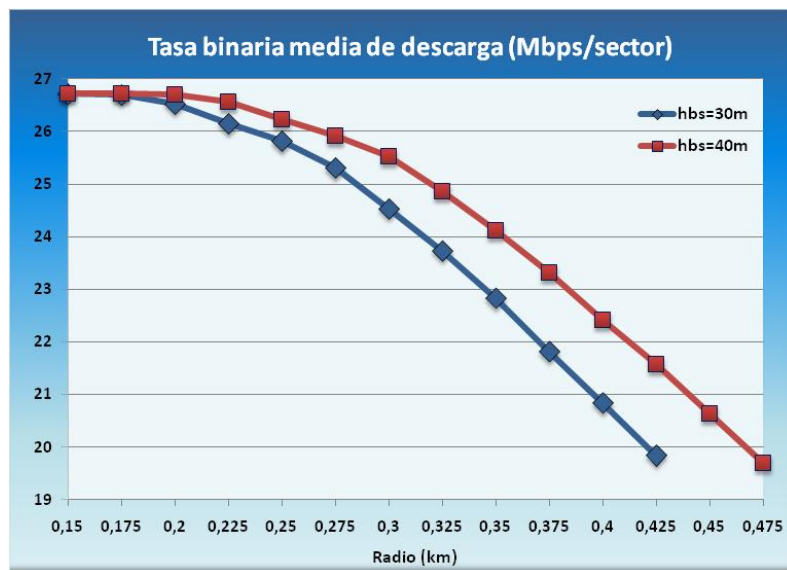


Figura 3- 18: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona urbana con una anchura de haz de 120°.

Podemos observar en la Figura 3-16 que para una anchura de haz de la antena transmisora de 60°, los usuarios no podrán disfrutar de la máxima tasa binaria media de descarga a ninguna altura del edificio ni a ninguna distancia de la estación base ya que como hemos podido observar en las gráficas de SINR para esa anchura de haz no se conseguían los 24,4 dB necesarios para aplicar la mayor modulación posible.

3.1.2. Zona suburbana.

La zona B según el modelo de Erceg es aplicable a áreas suburbanas. En este epígrafe se muestran las simulaciones obtenidas en terrenos dentro de esta zona; el objetivo es buscar resultados en el interior de un edificio de cuatro plantas de altura.

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones para sistemas con múltiples interferencias cocanal para un sector de 120 grados y ancho de banda del canal de 10 MHz; se han realizado para diferentes anchuras de haz de la antena transmisora, exactamente para 60°, 90° y 120°; y para cada una de las cuatro alturas de las distintas plantas del edificio donde se encuentran las antenas receptoras, concretamente 1, 4, 7 y 10 metros. También se ha modificado la altura de la estación base para cada una de las cuatro alturas de edificio, las gráficas corresponden en todos los casos a valores de 30 metros y 40 metros de la altura de la BS y una potencia máxima de salida del transmisor de 40 dBm. Al igual que en las zonas urbanas, se incluyen sólo las gráficas correspondientes al mínimo valor de SINR para aplicar la menor modulación posible (BPSK), 6.4 dB, a un valor de SINR medio de 12 dB, así como al mínimo valor de SINR para aplicar la mayor modulación posible (64QAM), 24.4 dB, ver epígrafe 2.4.1.2.

3.1.2.1. Altura de la antena del usuario de 1 metro.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

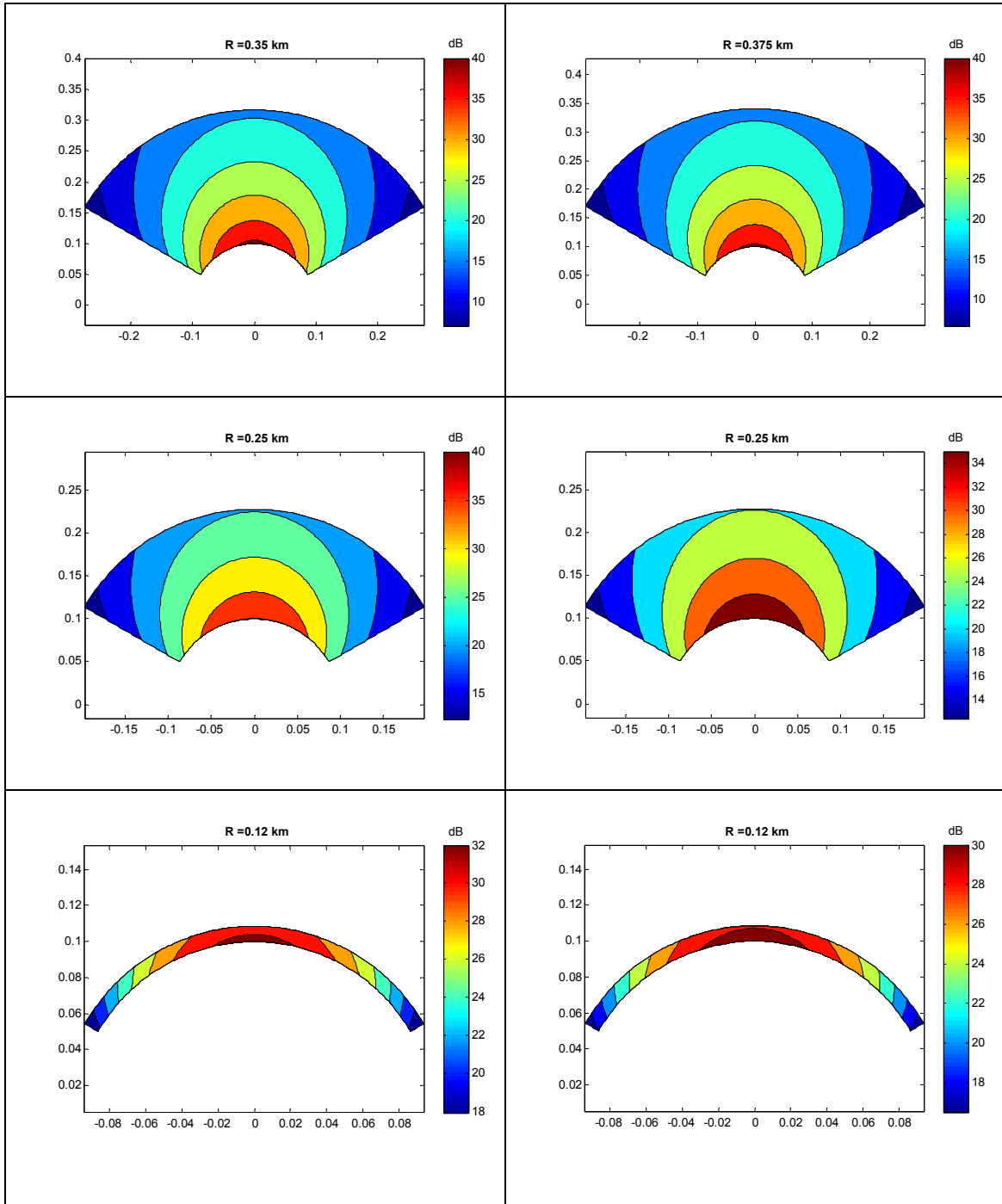


Figura 3- 19: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

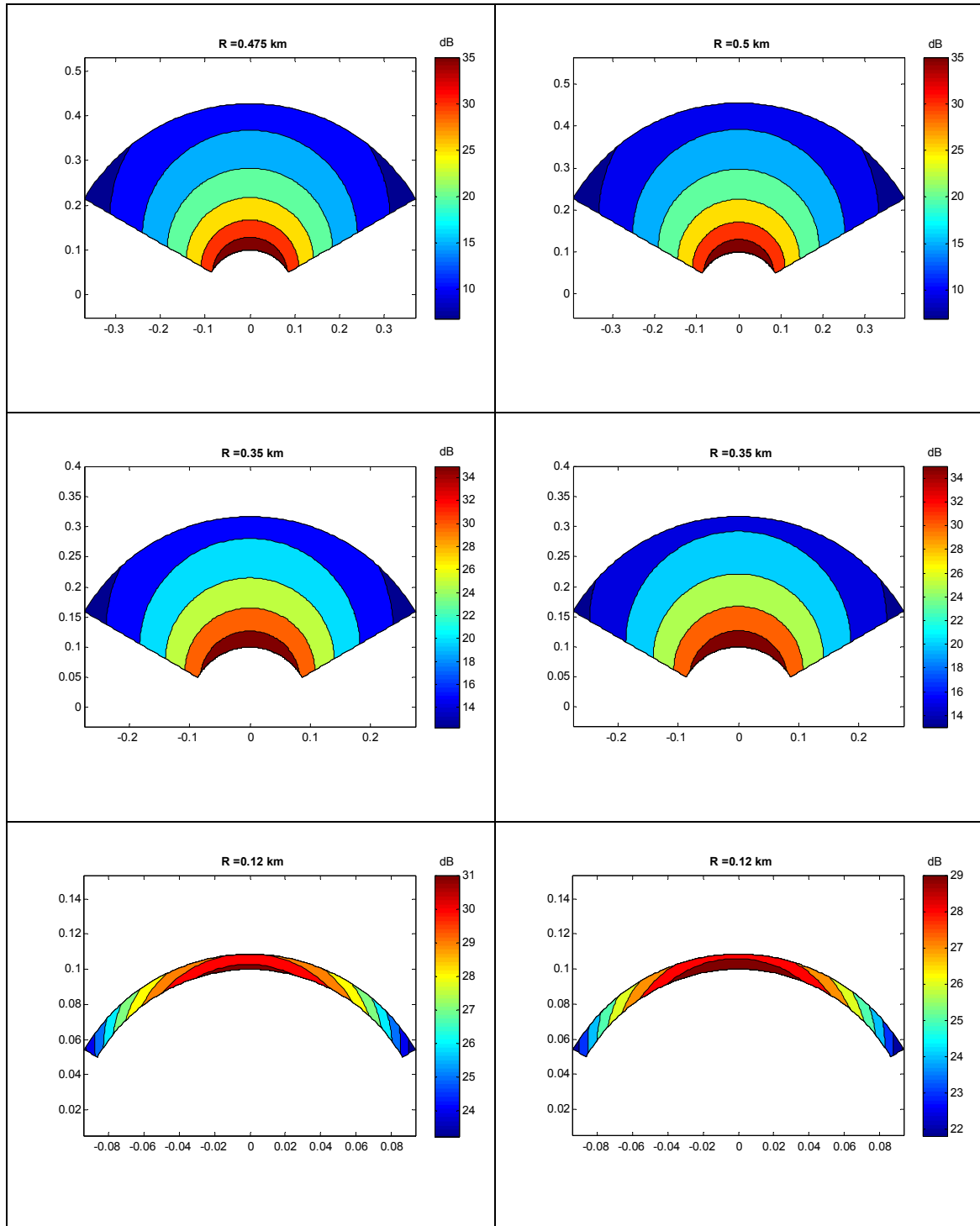


Figura 3- 20: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

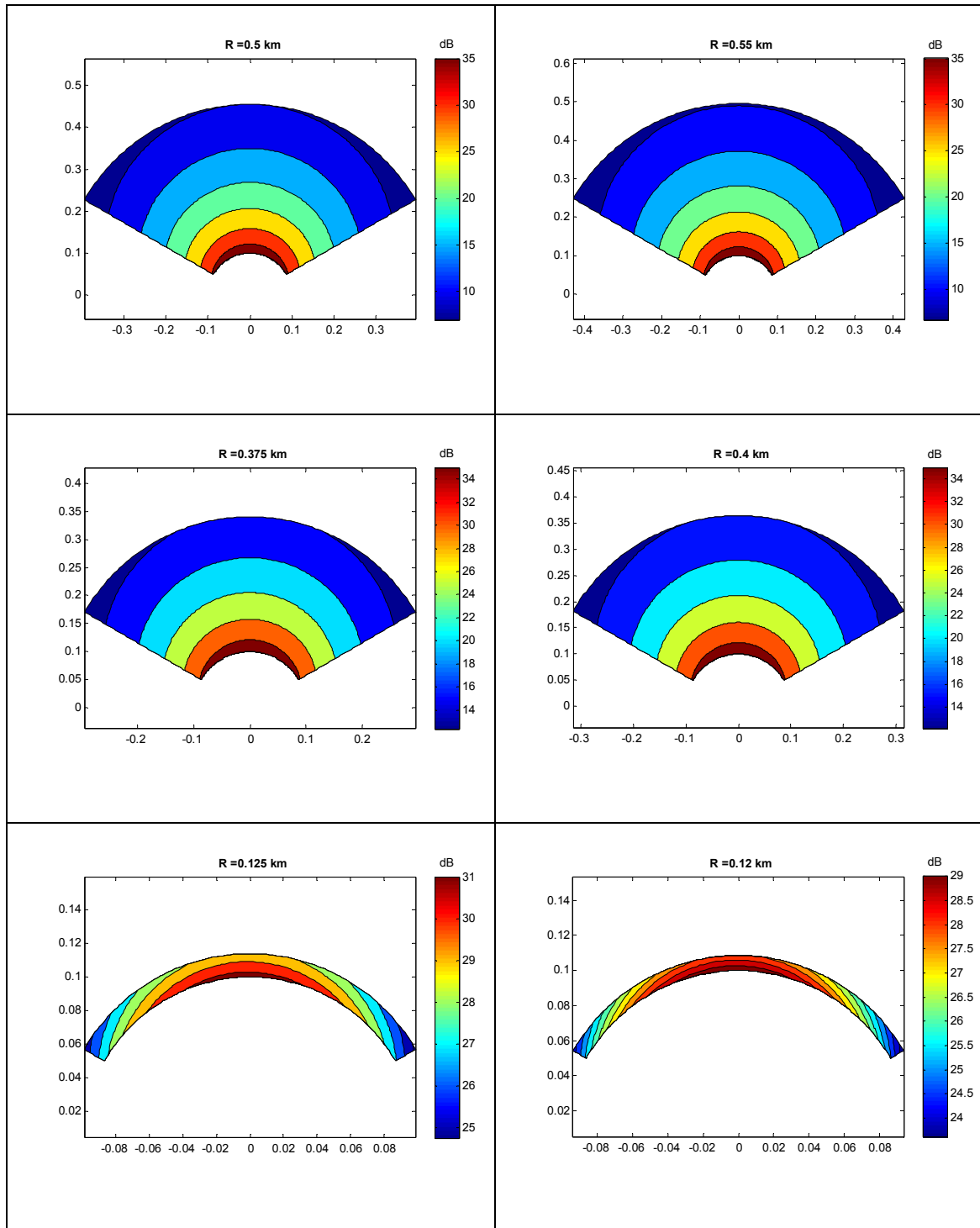


Figura 3- 21: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.2.2. Altura de la antena del usuario de 4 metros.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

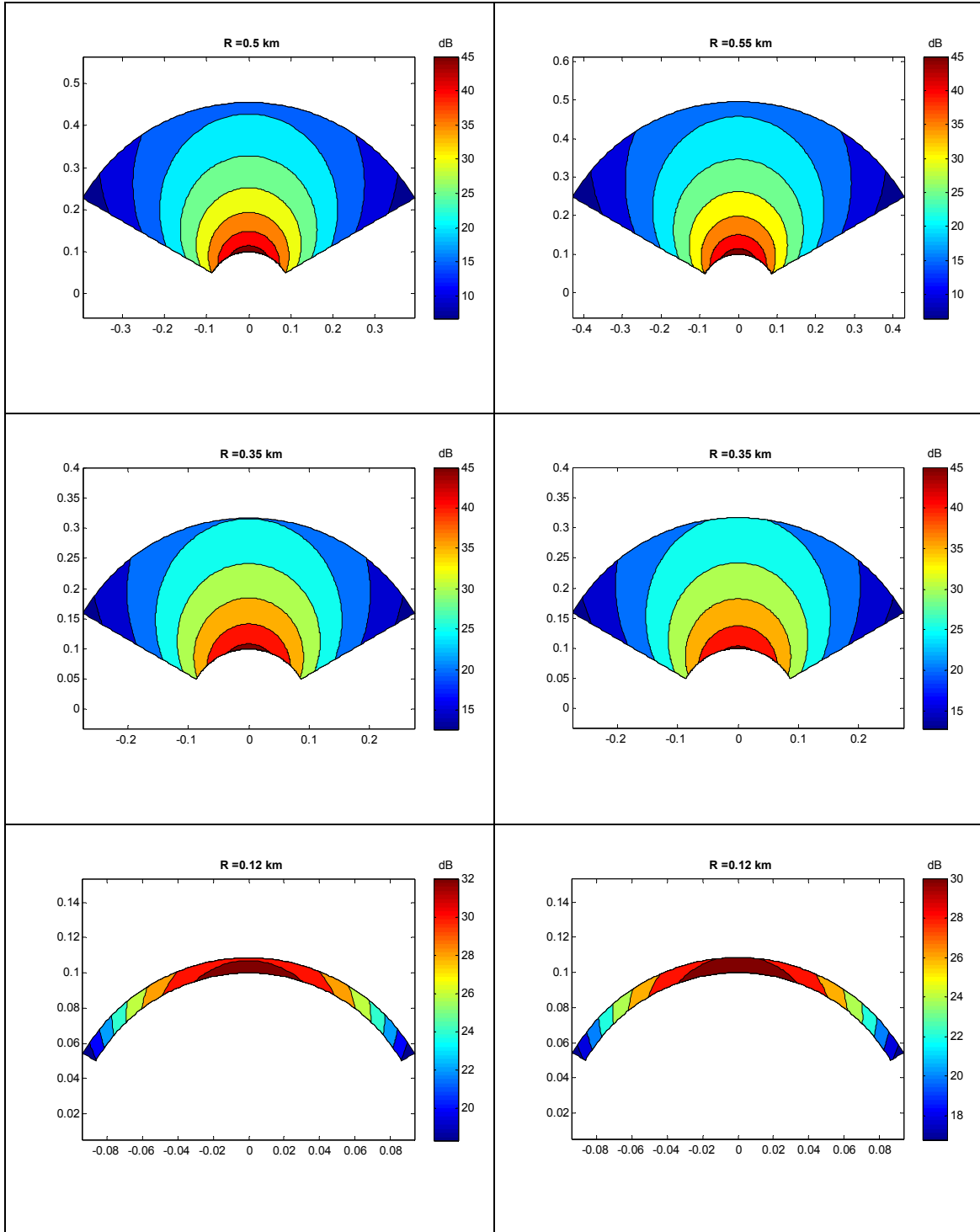


Figura 3- 22: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

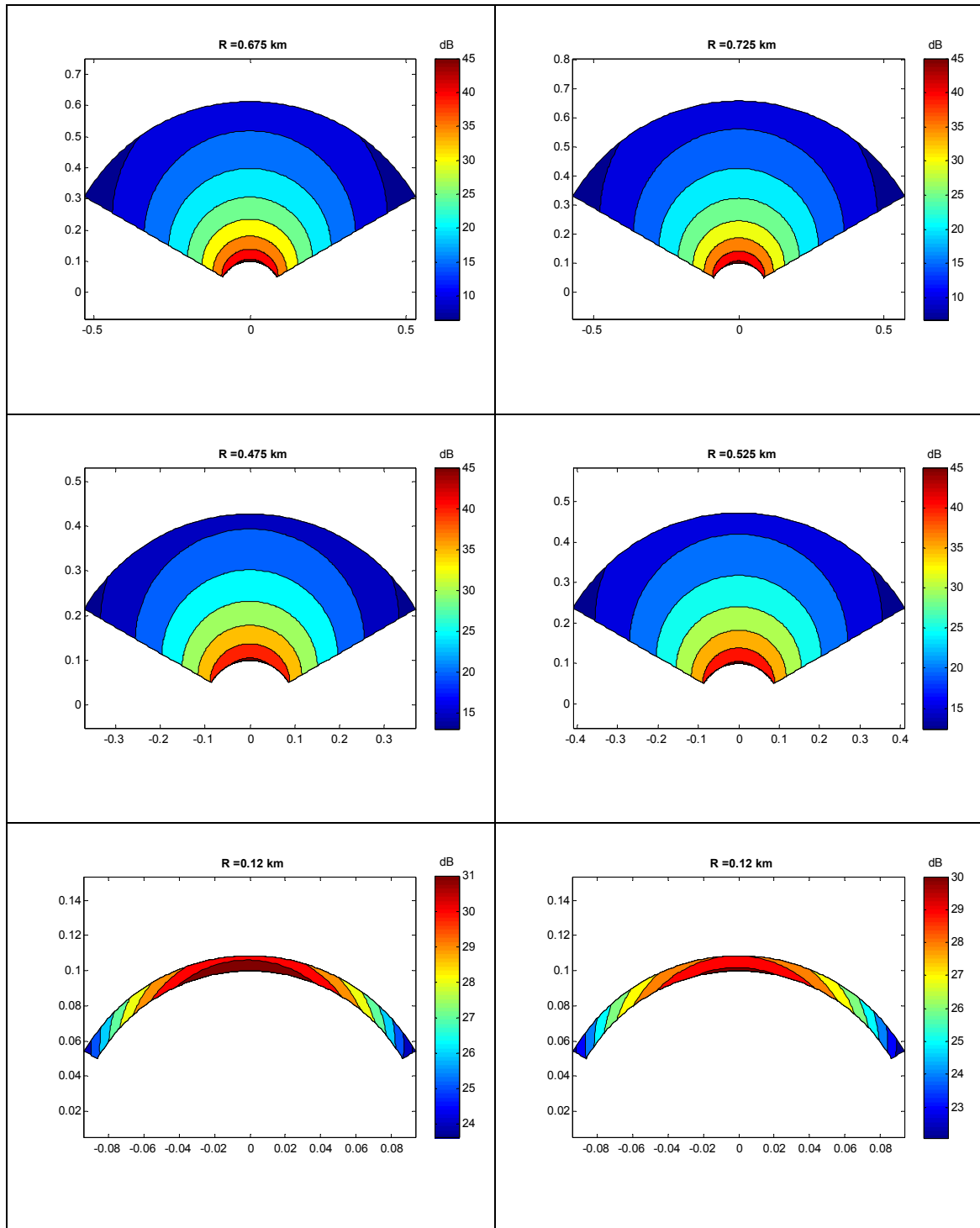


Figura 3- 23: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

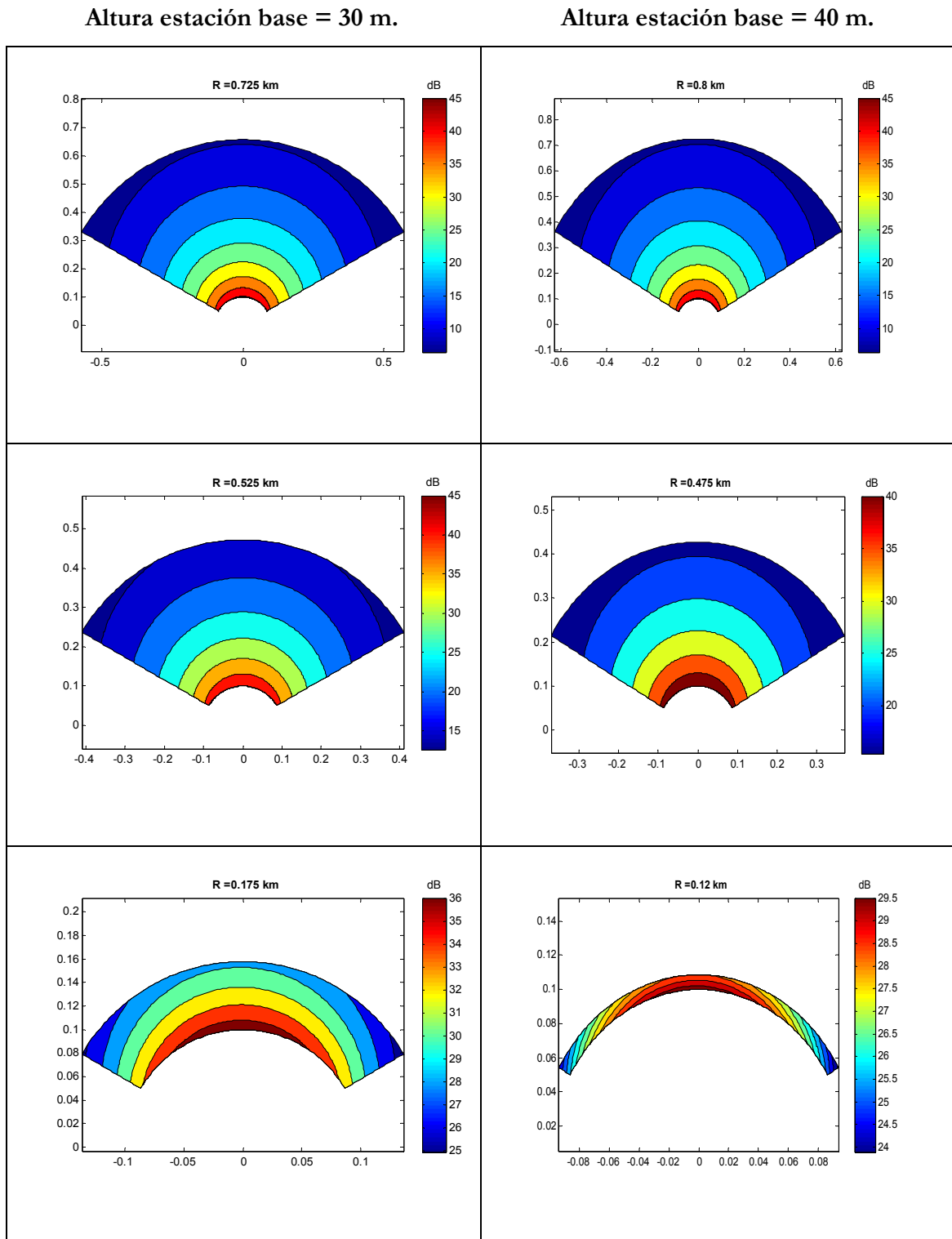


Figura 3- 24: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.2.3. Altura de la antena del usuario de 7 metros.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

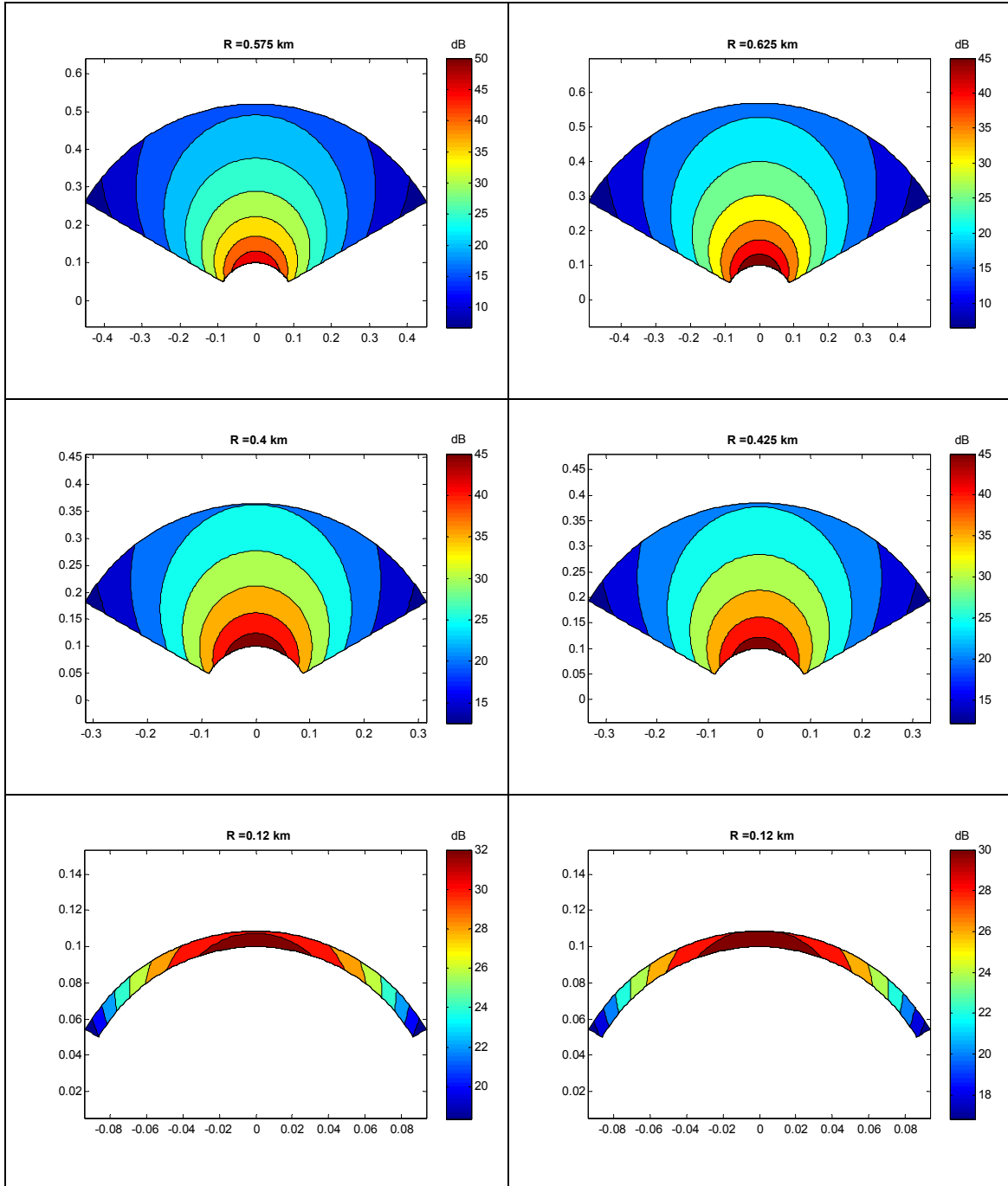


Figura 3- 25: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

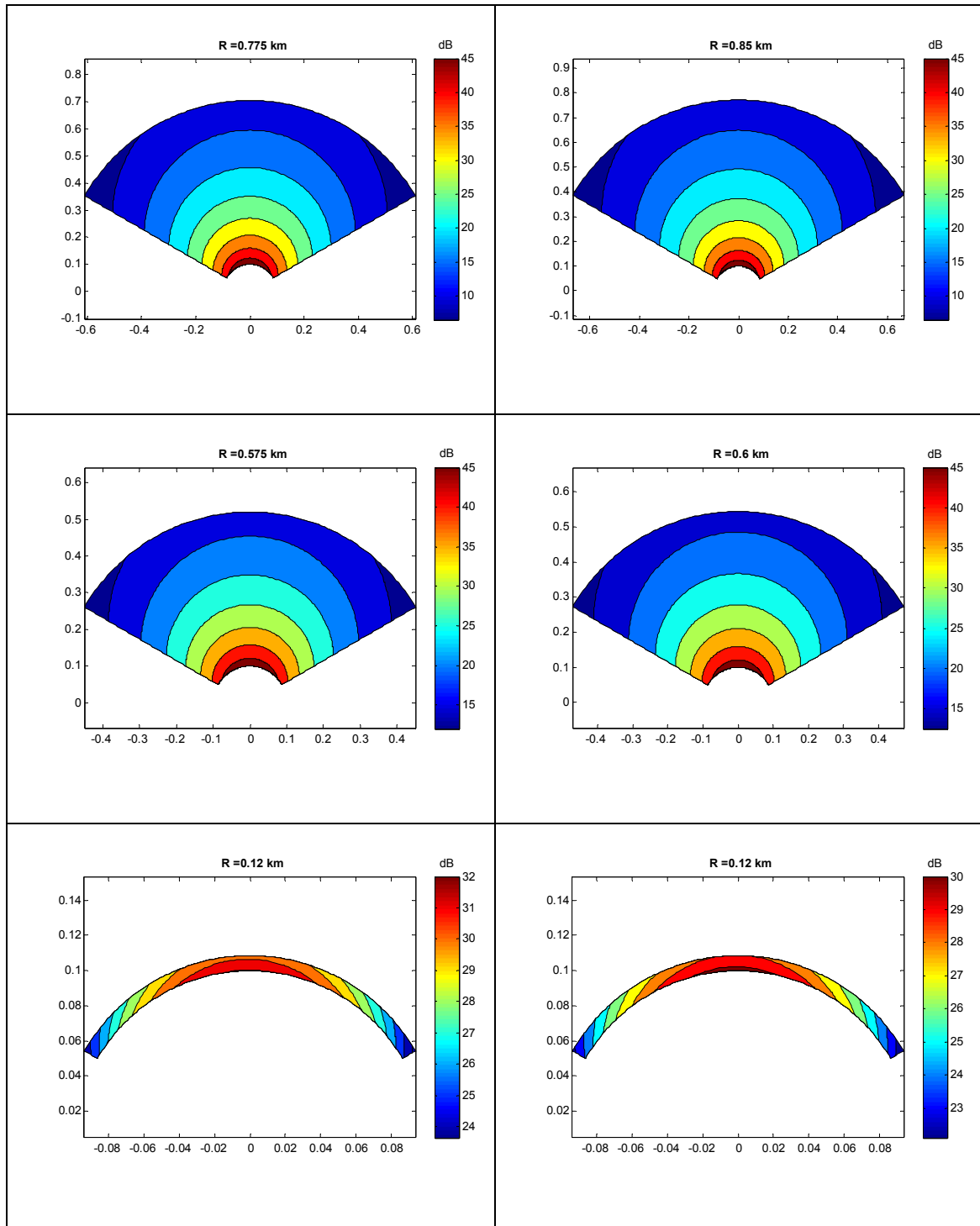


Figura 3- 26: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

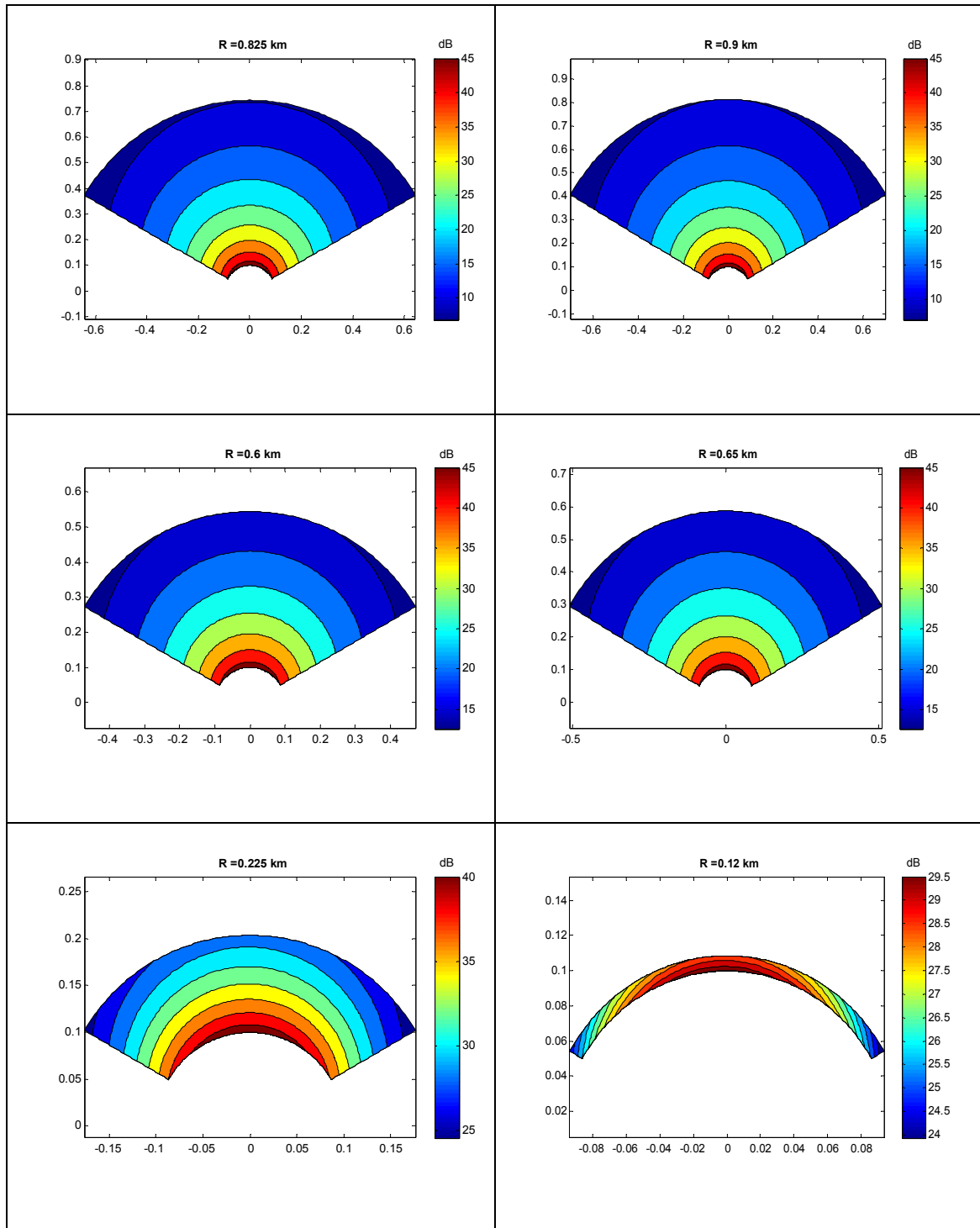


Figura 3- 27: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.2.4. Altura de la antena del usuario de 10 metros.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

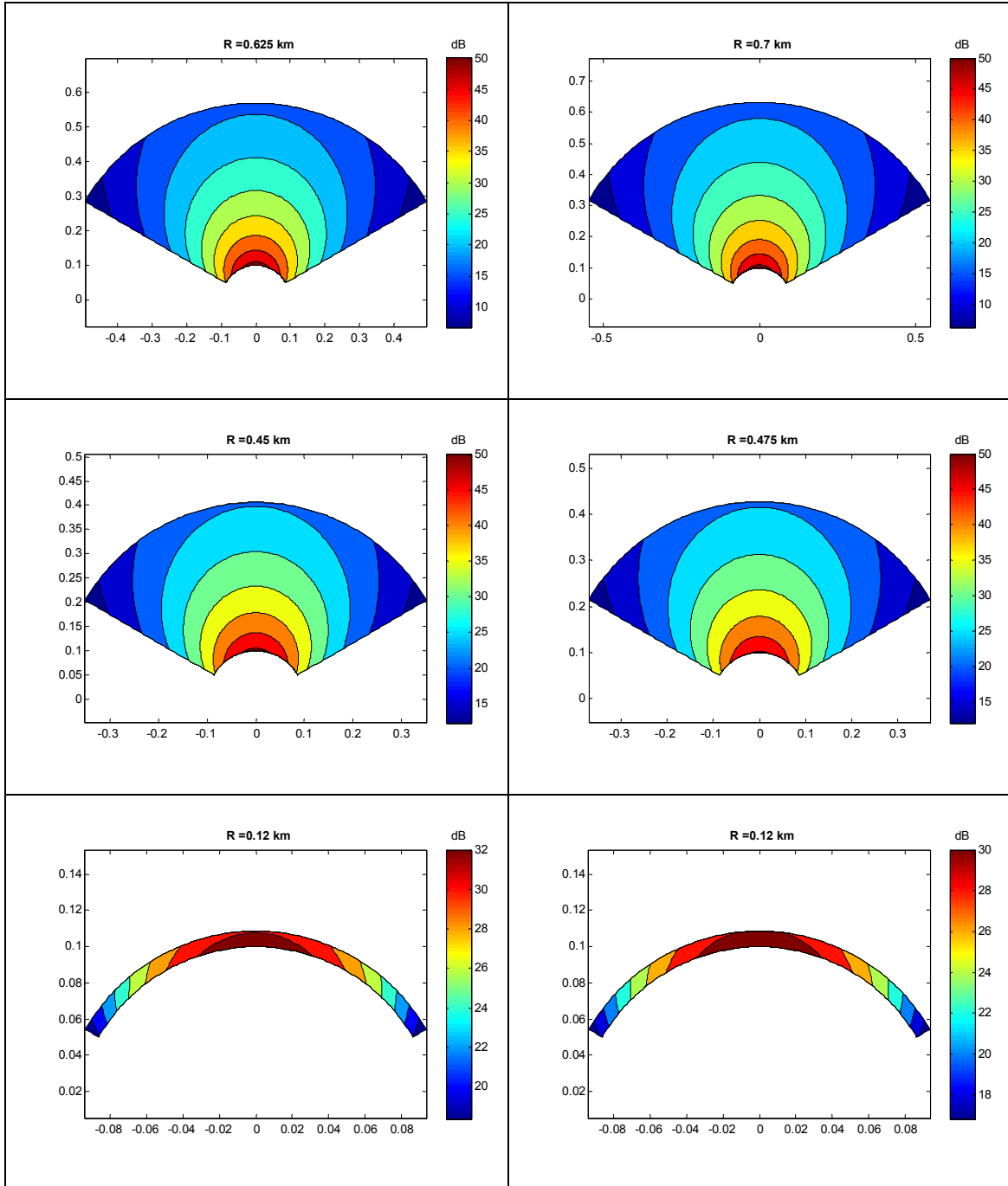


Figura 3- 28: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

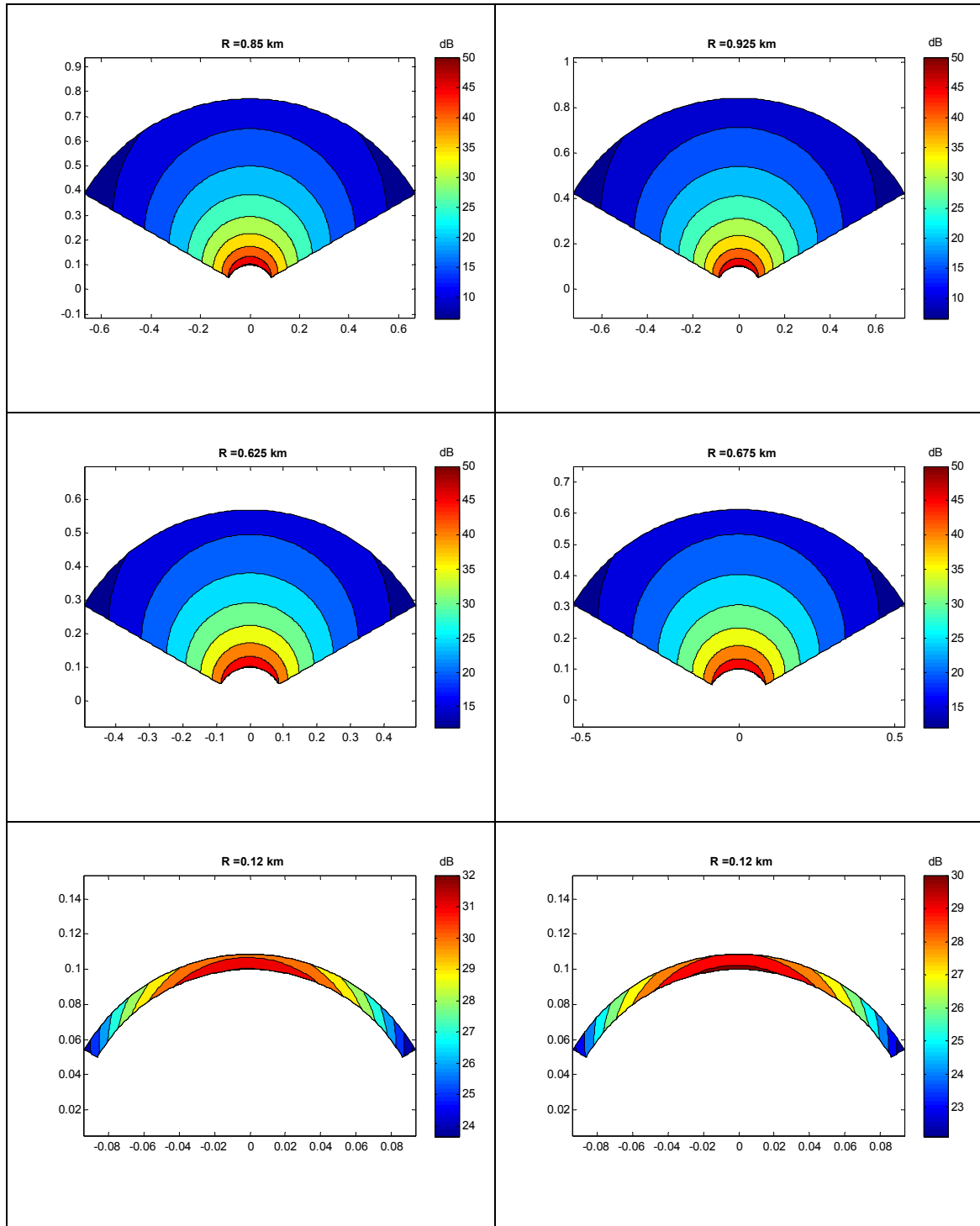


Figura 3- 29: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

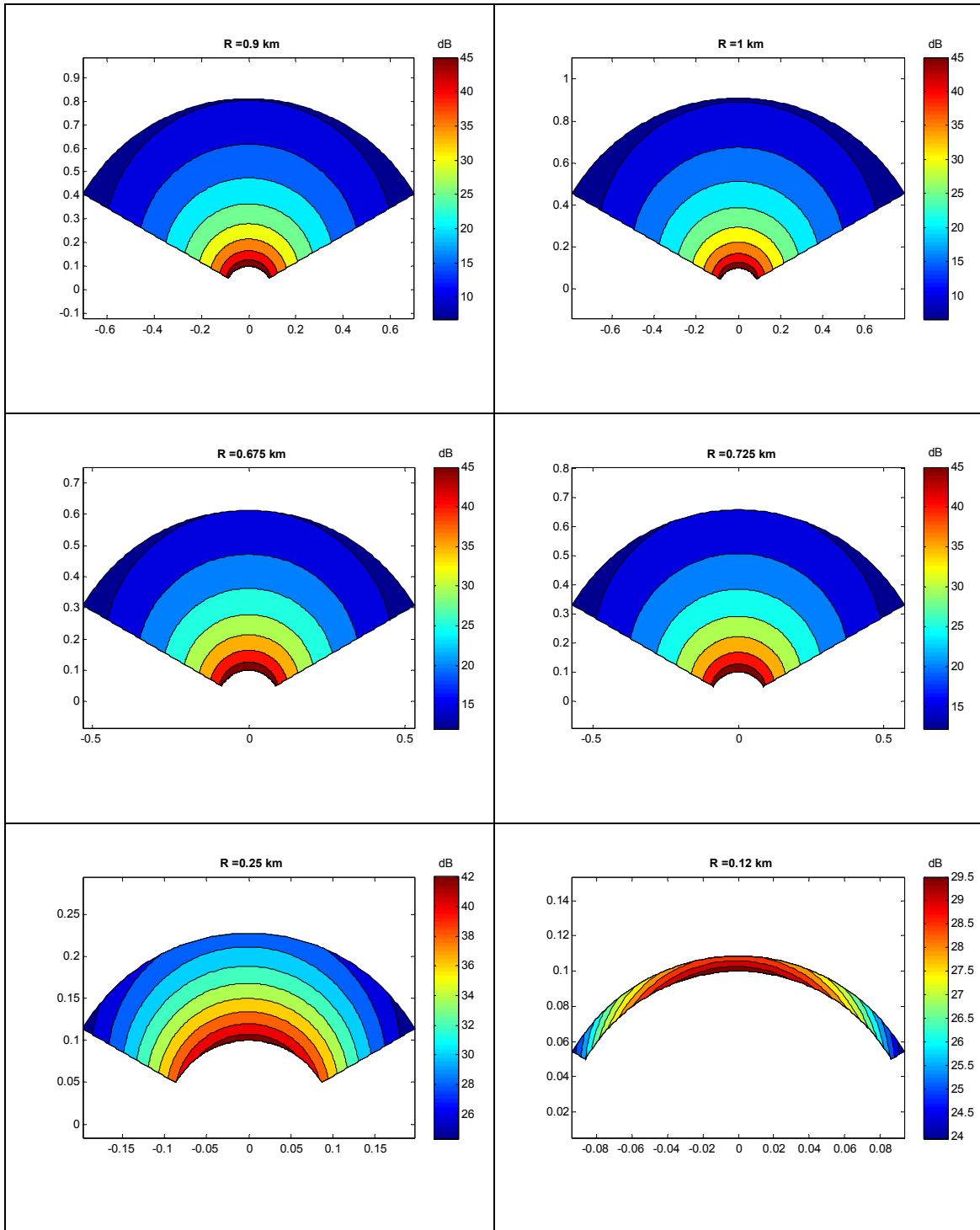


Figura 3- 30: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.2.5. Valor medio de tasa binaria de descarga para los usuarios en el edificio.

A continuación se muestran las gráficas para los valores promedio de tasa binaria de descarga para las alturas de estación base de 30 metros y 40 metros en una zona suburbana. El radio máximo de trabajo de la celda viene limitado por la menor altura de estación suscriptor que tiene valor 1 metro.

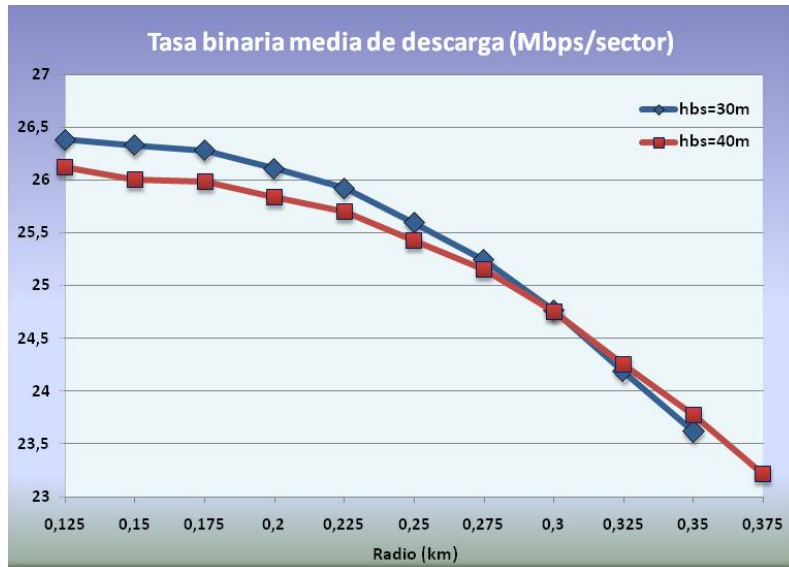


Figura 3- 31: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona suburbana con una anchura de haz de 60°.

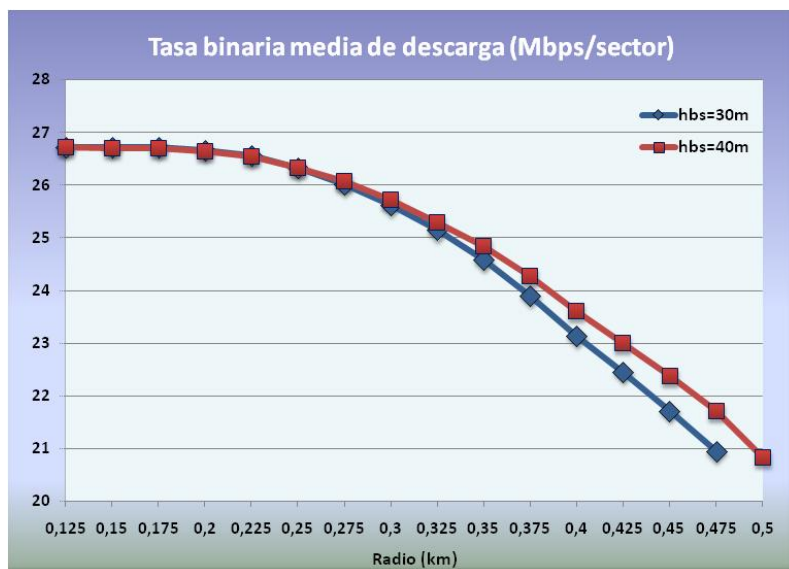


Figura 3- 32: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona suburbana con una anchura de haz de 90°.

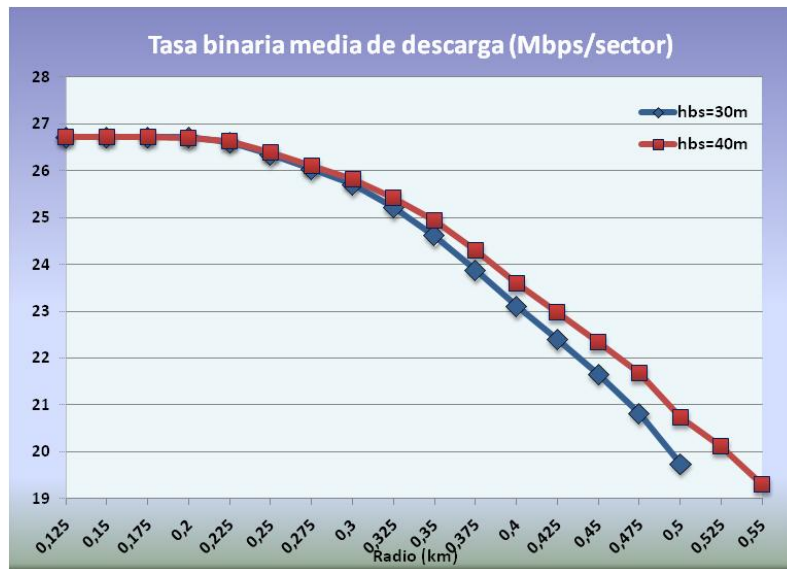


Figura 3- 33: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona suburbana con una anchura de haz de 120°.

Se puede apreciar que el radio máximo de celda en las zonas suburbanas es mayor cuanto mayor sea la anchura de haz de la antena transmisora. En todos los casos, los valores de tasa binaria son superiores para la altura de estación base de 40 metros que para 30 metros, salvo para una anchura de haz de la antena de transmisión de 60°.

Al igual que ocurría en la zona urbana, podemos deducir de la Figura 3-31 que para una anchura de haz de la antena transmisora de 60°, los usuarios no podrán disfrutar de la máxima tasa binaria media de descarga a ninguna altura del edificio ni a ninguna distancia de la estación base.

3.1.3. Área rural.

La zona C según el modelo de Erceg es aplicable a zonas rurales donde existe muy baja densidad de población. En este epígrafe se mostrarán las simulaciones obtenidas terrenos dentro de esta zona; el objetivo, como en las zonas urbanas y suburbanas, es buscar resultados en el interior de un edificio de cuatro plantas de altura.

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones para sistemas con múltiples interferencias cocanal para un sector de 120 grados y ancho de banda del canal de 10 MHz; se han realizado para diferentes anchuras de haz de la antena transmisora, exactamente para 60°, 90° y 120°; y para cada una de las cuatro alturas de las distintas plantas del edificio donde se encuentran las antenas receptoras, concretamente 1, 4, 7 y 10 metros. También se ha modificado la altura de la estación base para cada una de las cuatro alturas de edificio, las gráficas corresponden en todos los casos a valores de 30 metros y 40 metros de la altura de la BS y una potencia máxima de salida del transmisor de 40 dBm. Al igual que en las zonas urbanas y suburbanas, se incluyen solo las gráficas correspondientes al mínimo valor de SINR para aplicar la menor modulación posible (BPSK), 6.4 dB, a un valor de SINR medio de 12 dB y por último, al mínimo valor de SINR para aplicar la mayor modulación posible (64QAM), 24.4 dB, ver epígrafe 2.4.1.2.

3.1.3.1. Altura de la antena del usuario de 1 metro.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

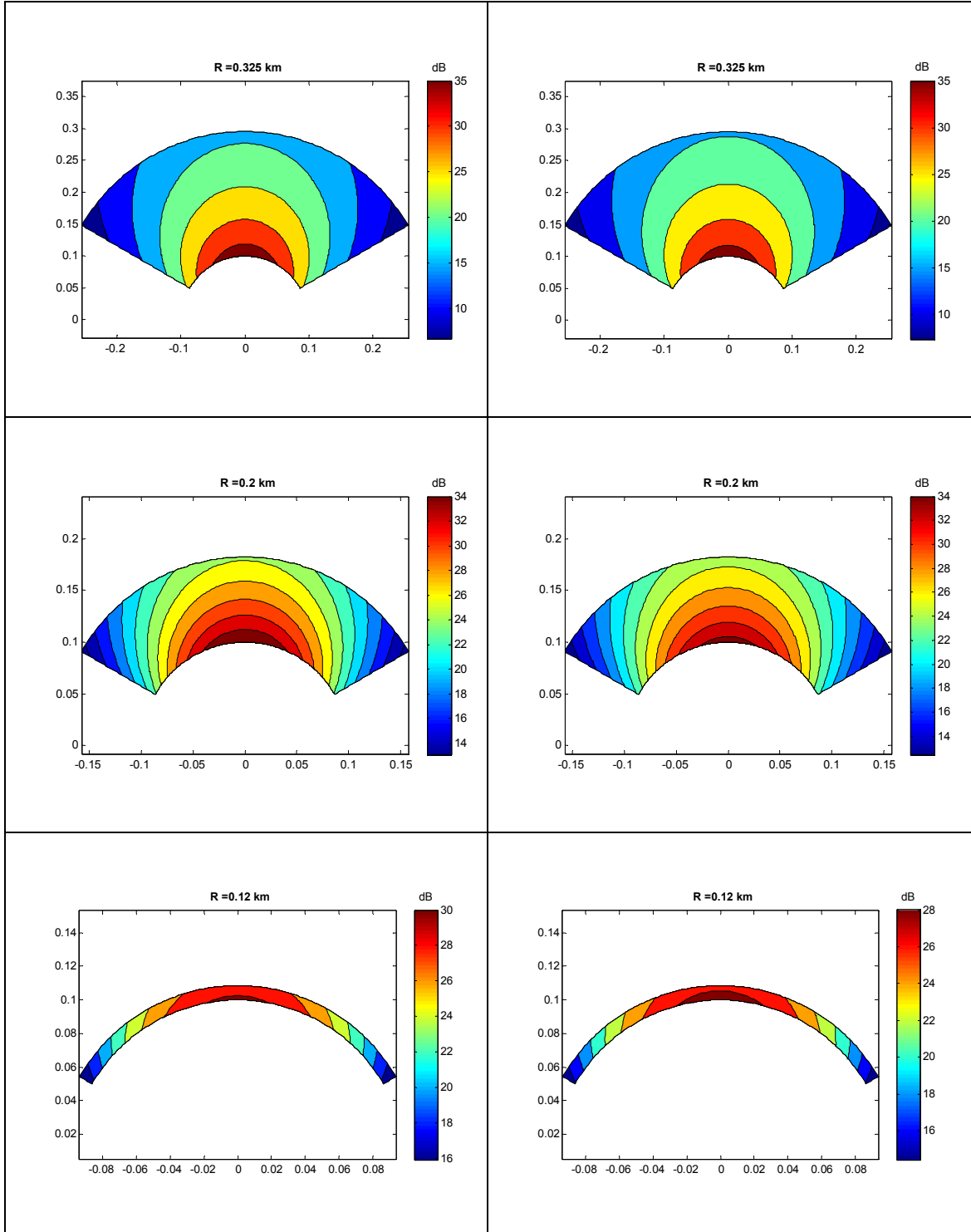


Figura 3- 34: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

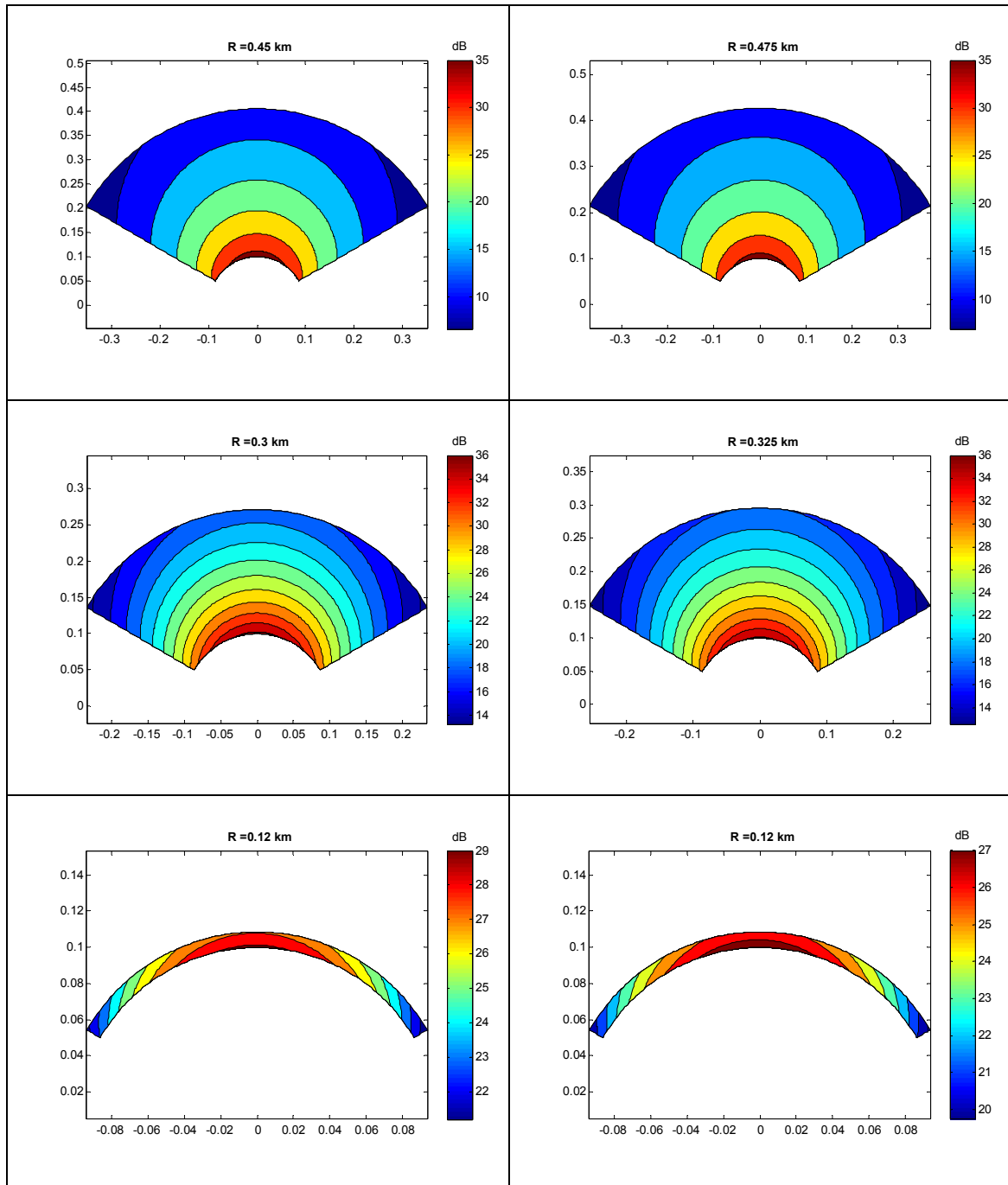


Figura 3- 35: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

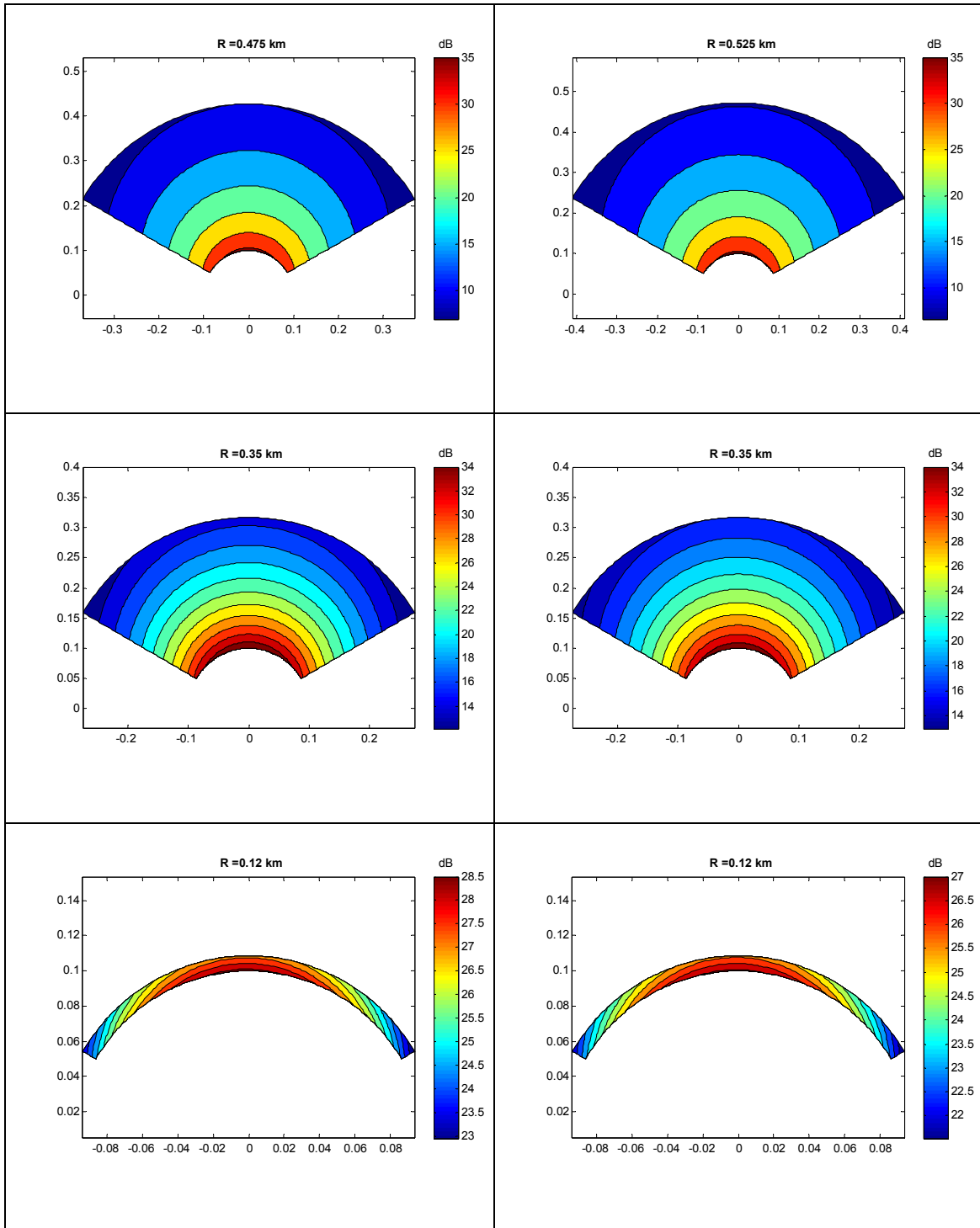


Figura 3- 36: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.3.2. Altura de la antena del usuario de 4 metros.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

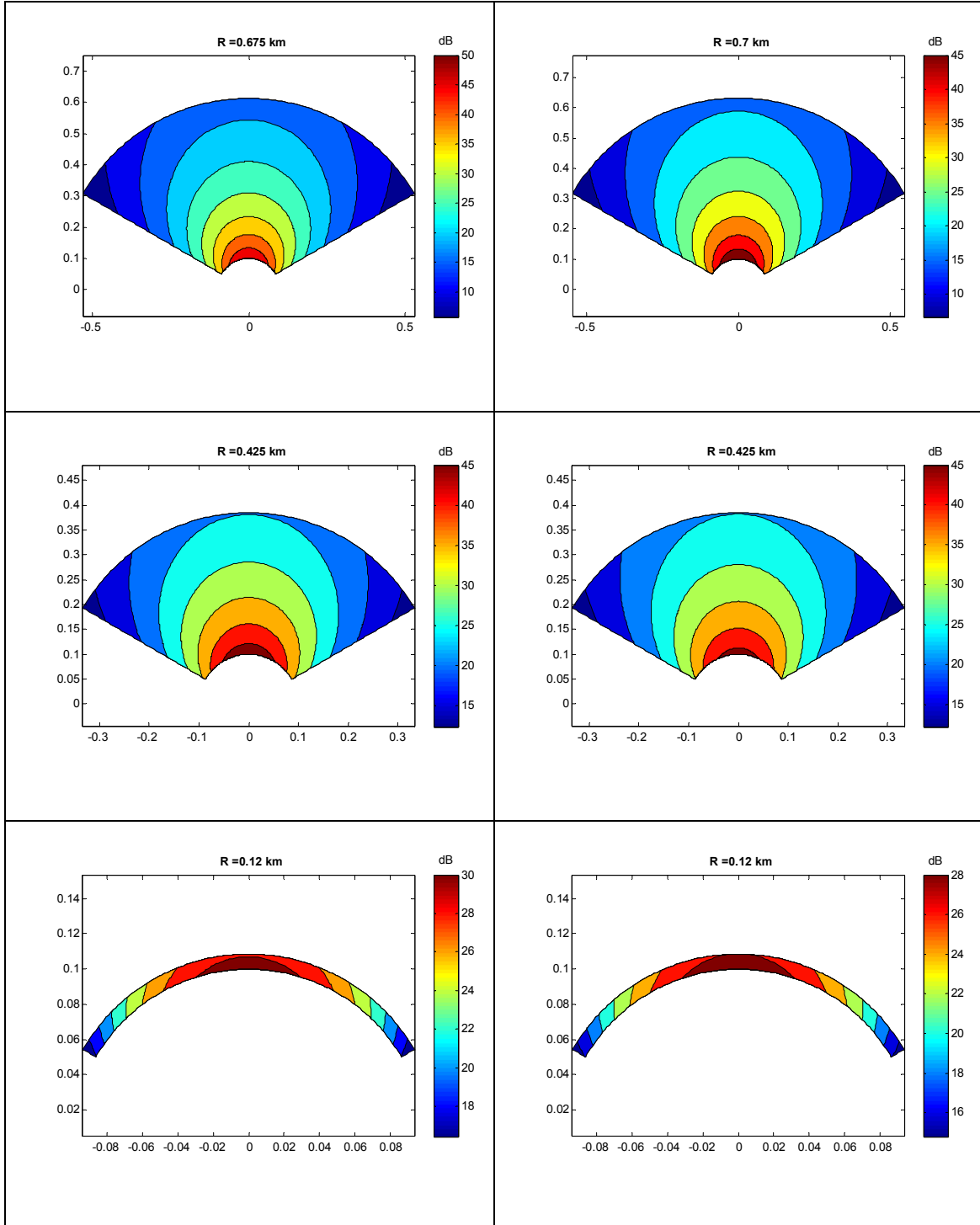


Figura 3- 37: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

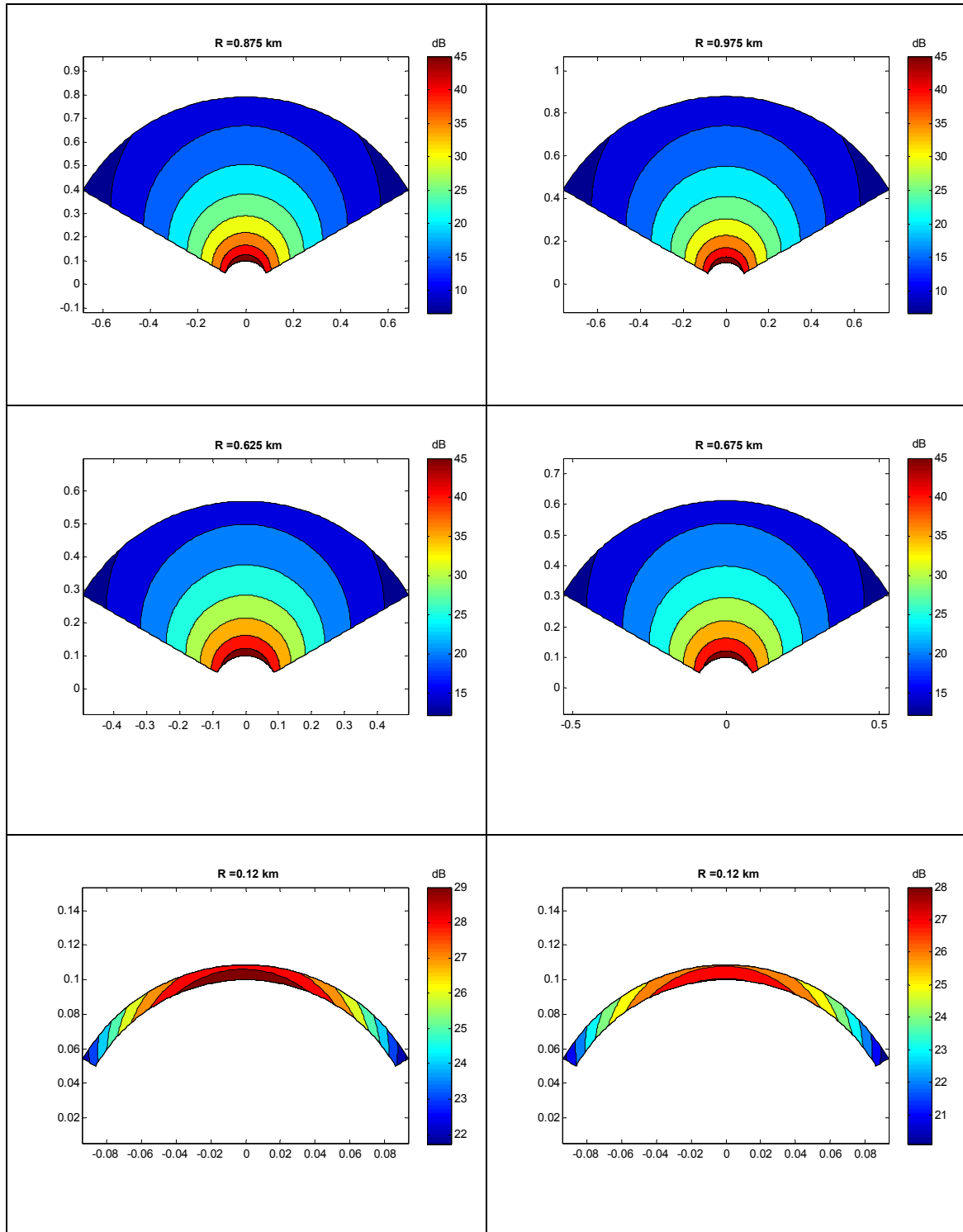


Figura 3- 38: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

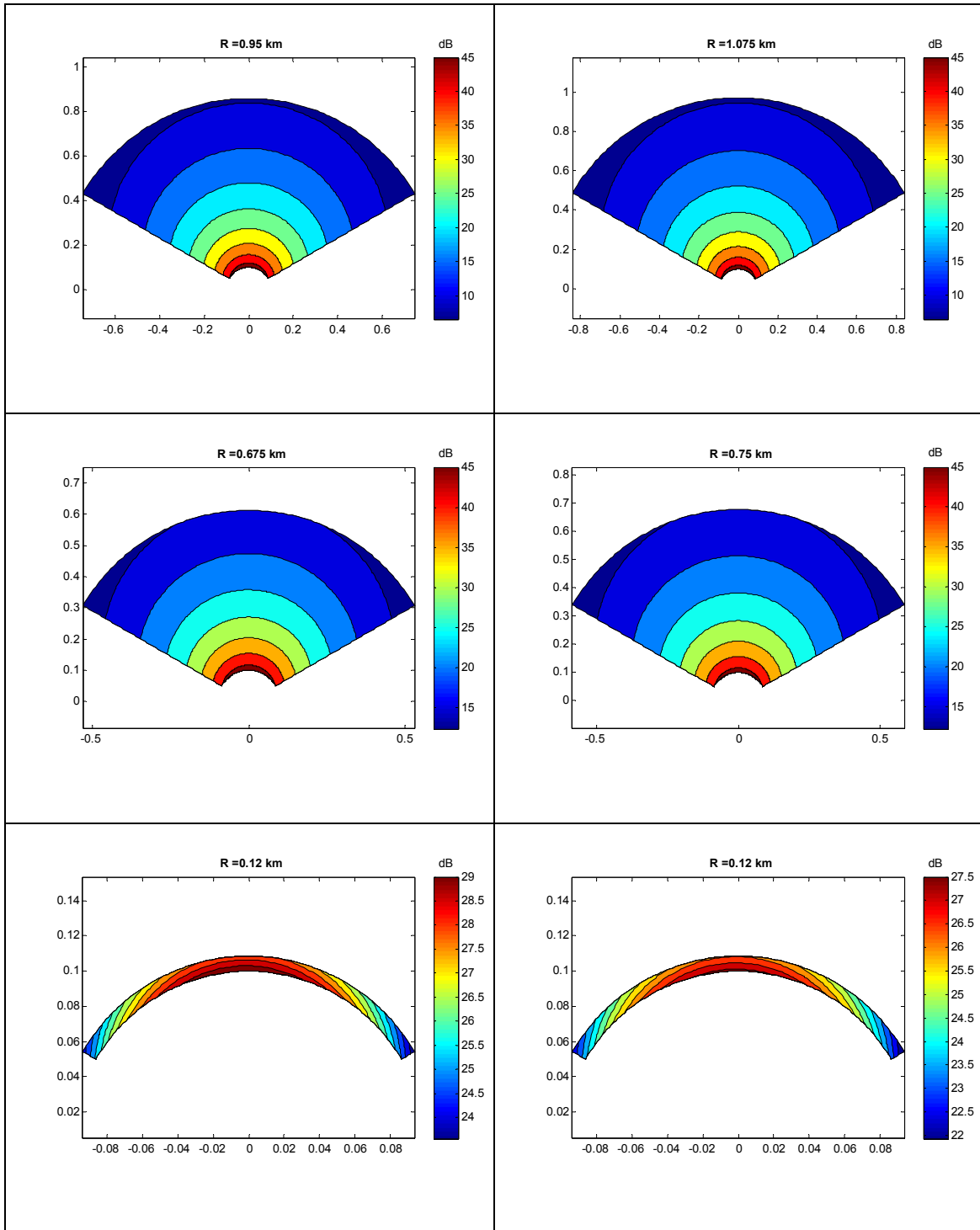


Figura 3- 39: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 4 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.3.3. Altura de la antena del usuario de 7 metros.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

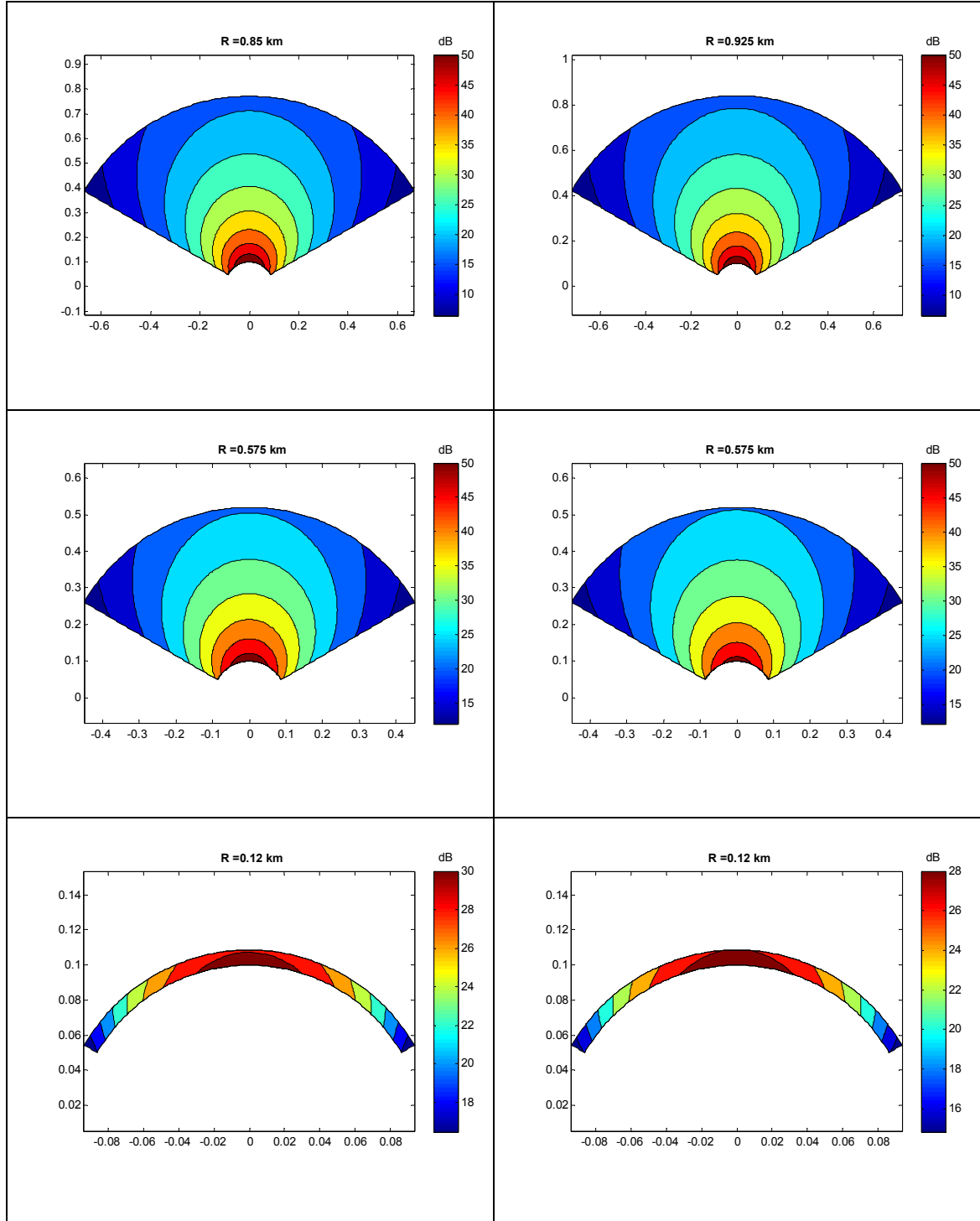


Figura 3- 40: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

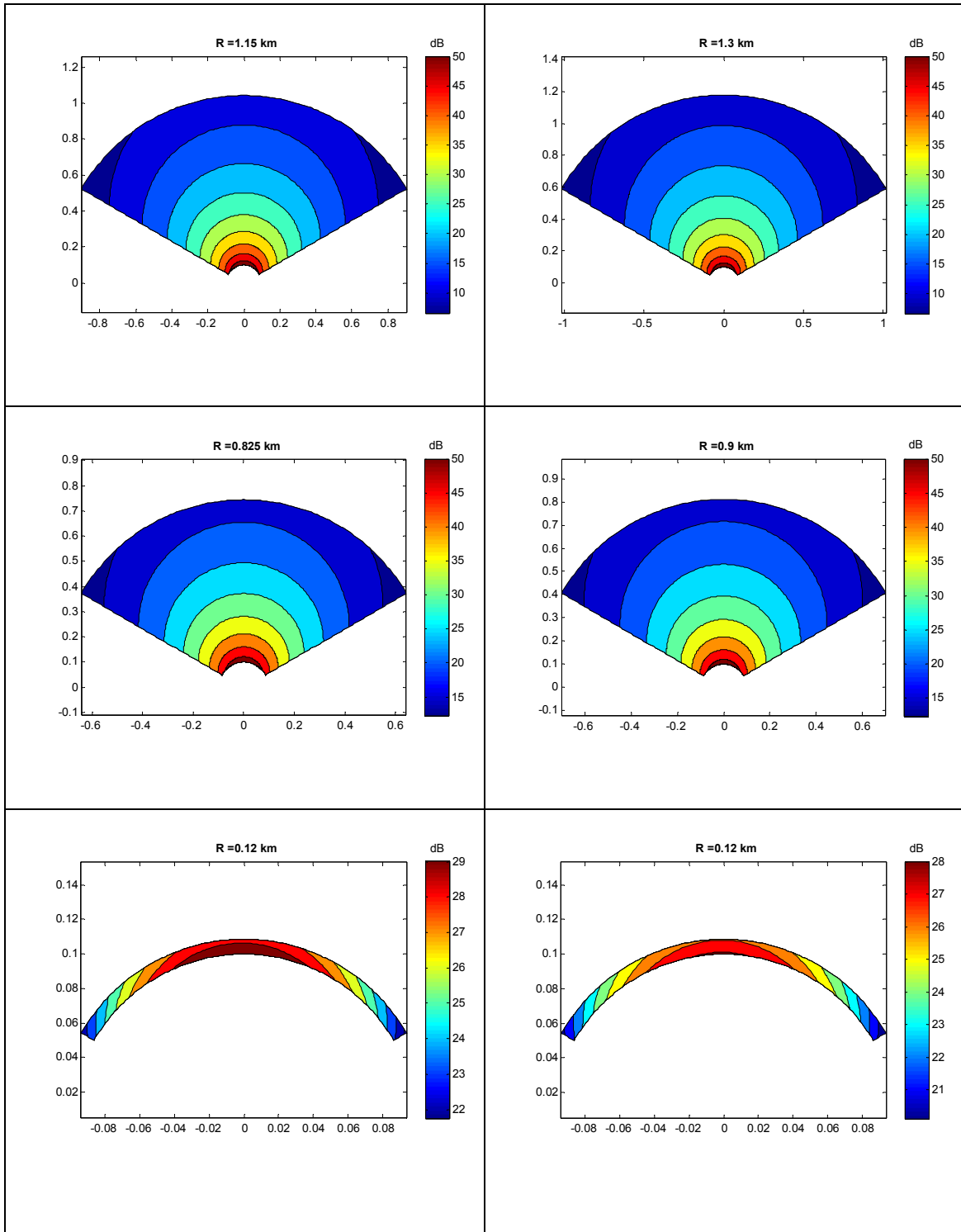


Figura 3- 41: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

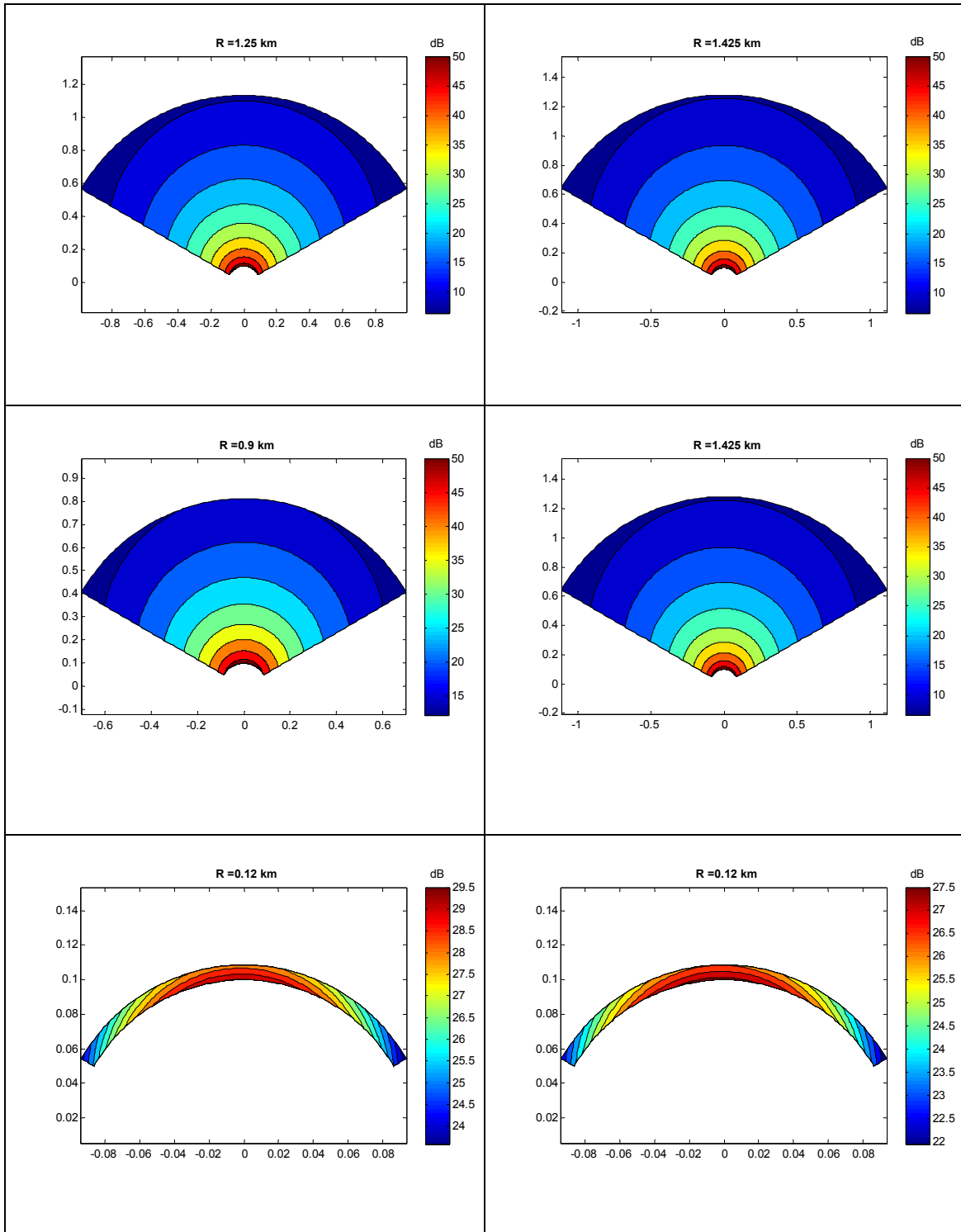


Figura 3- 42: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 7 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.3.4. Altura de la antena del usuario de 10 metros.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

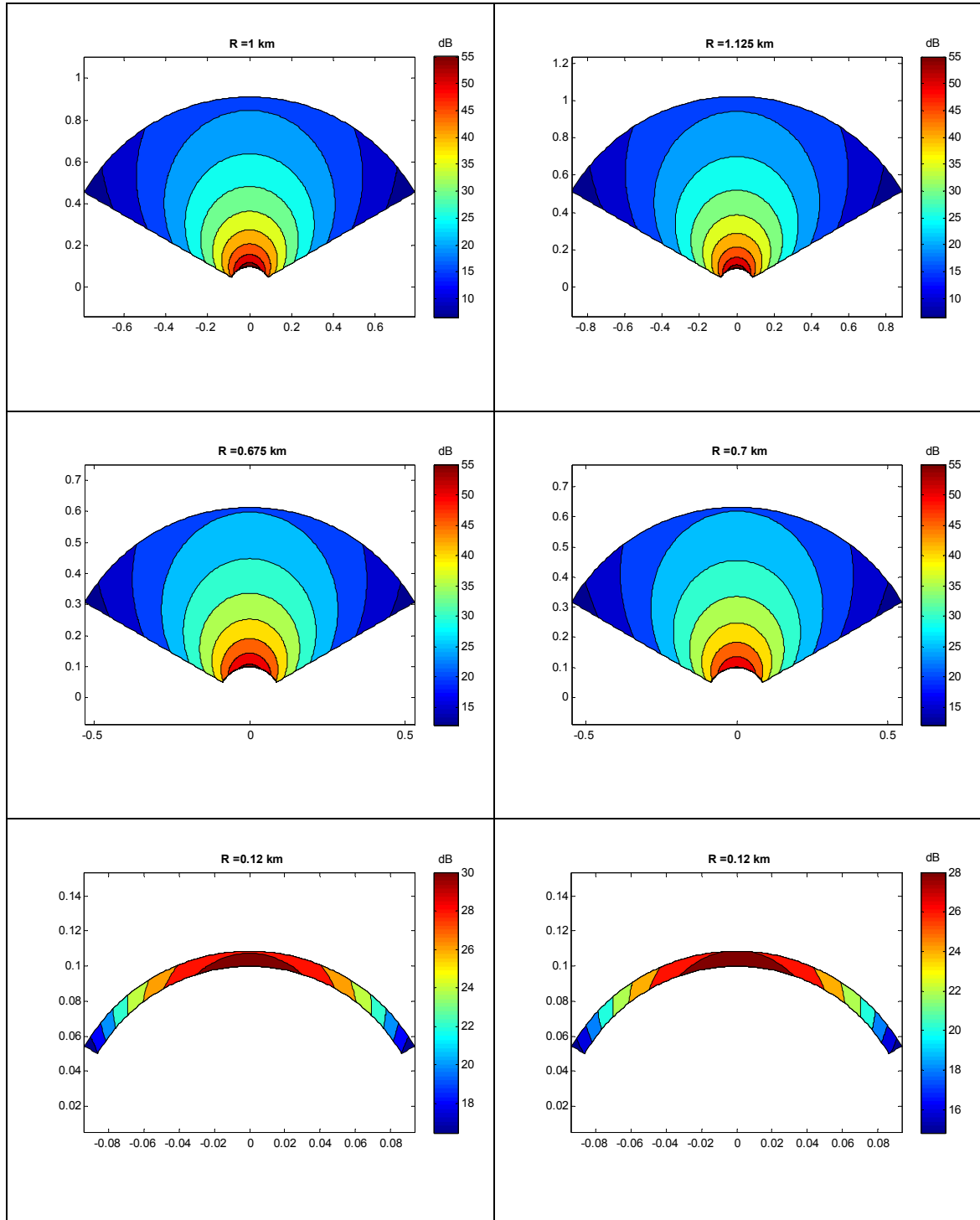


Figura 3- 43: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

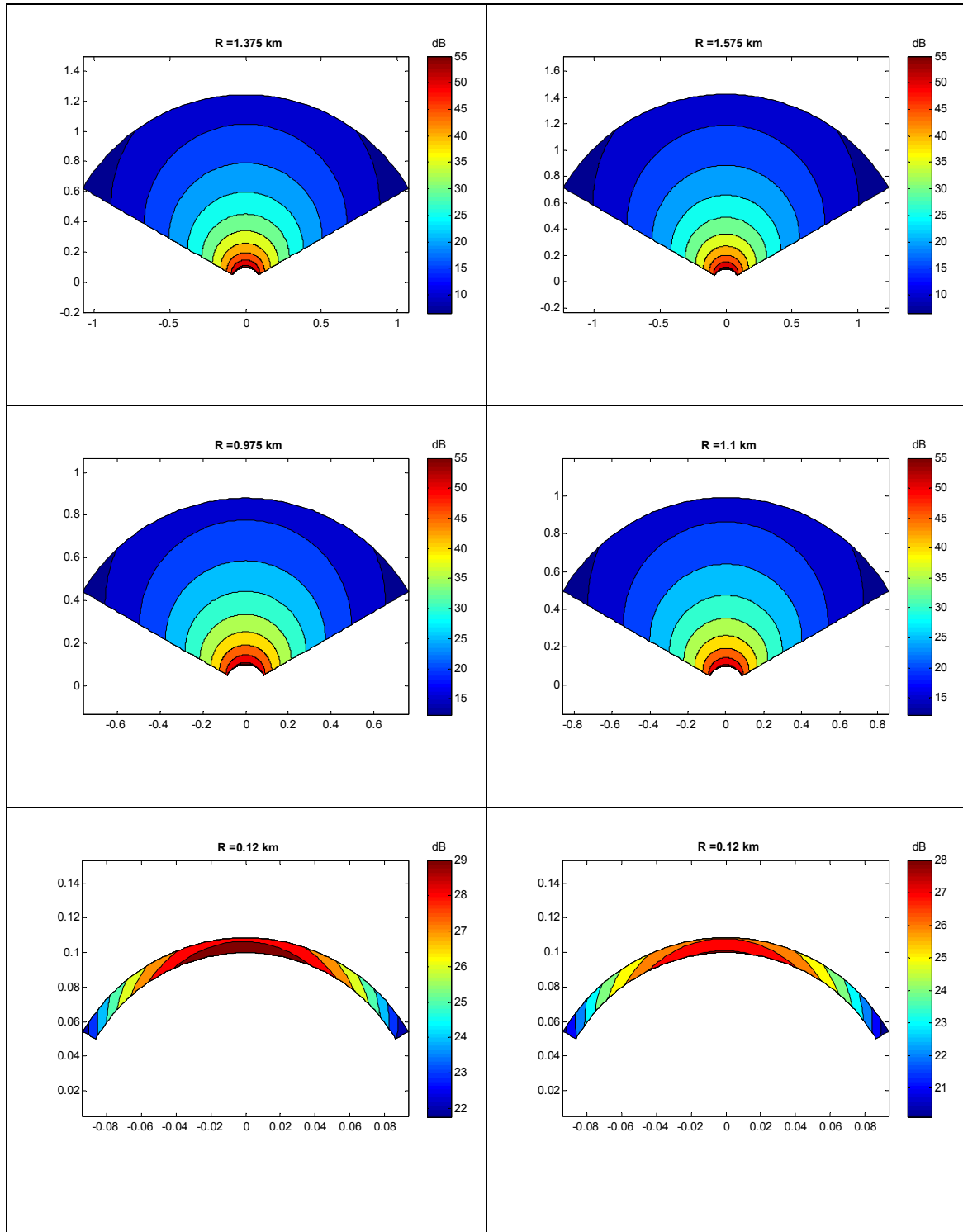


Figura 3- 44: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

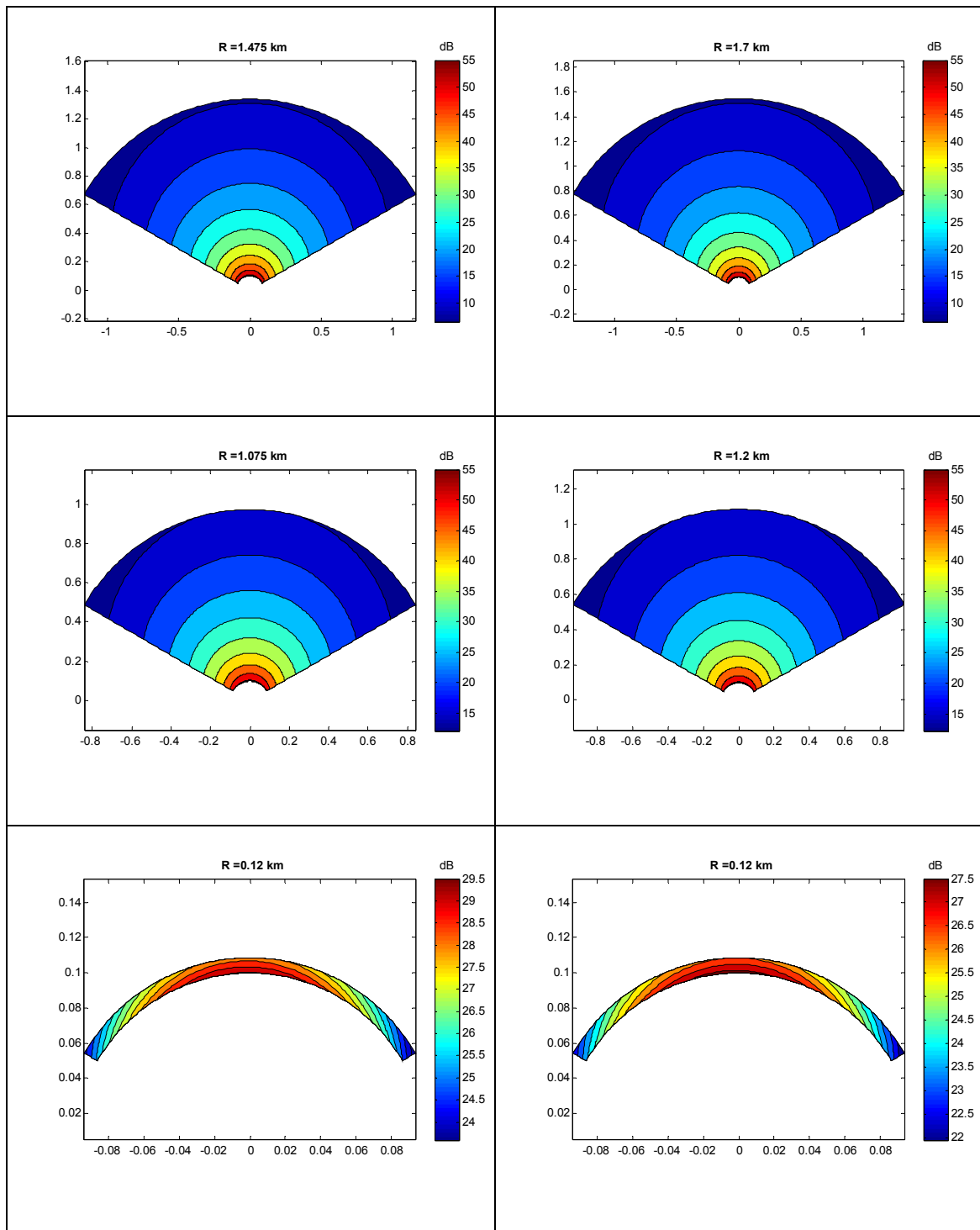


Figura 3- 45: Gráficas de SINR para sistemas receptores con altura 10 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.1.3.5. Valor medio de tasa binaria de descarga para los usuarios en el edificio.

A continuación se muestran las gráficas para los valores promedio de tasa binaria de descarga para las alturas de estación base de 30 metros y 40 metros en una zona rural. El radio máximo de celda viene limitado por la menor altura de estación suscriptor que tiene valor 1 metro.

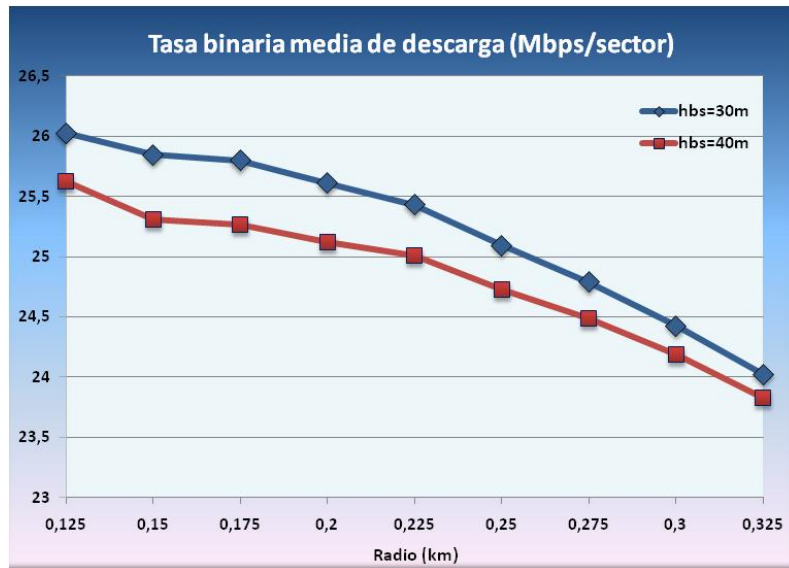


Figura 3- 46: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona rural con una anchura de haz de 60°.

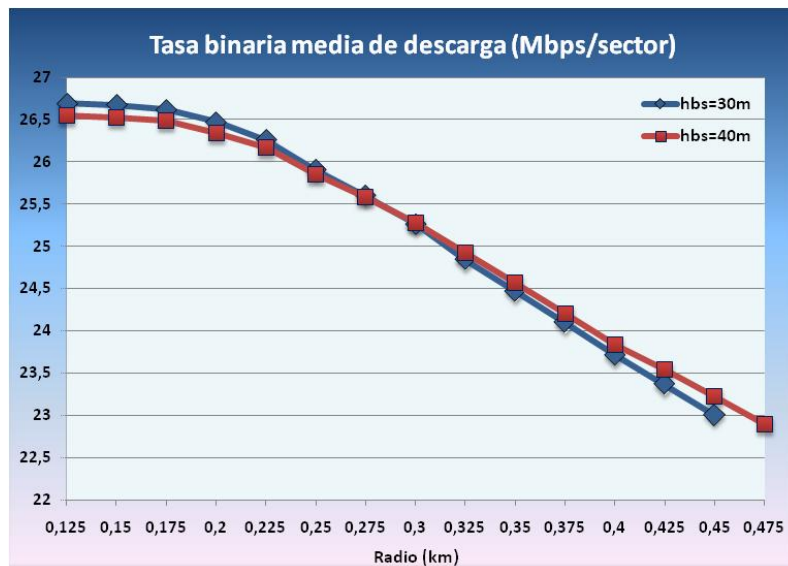


Figura 3- 47: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona rural con una anchura de haz de 90°.

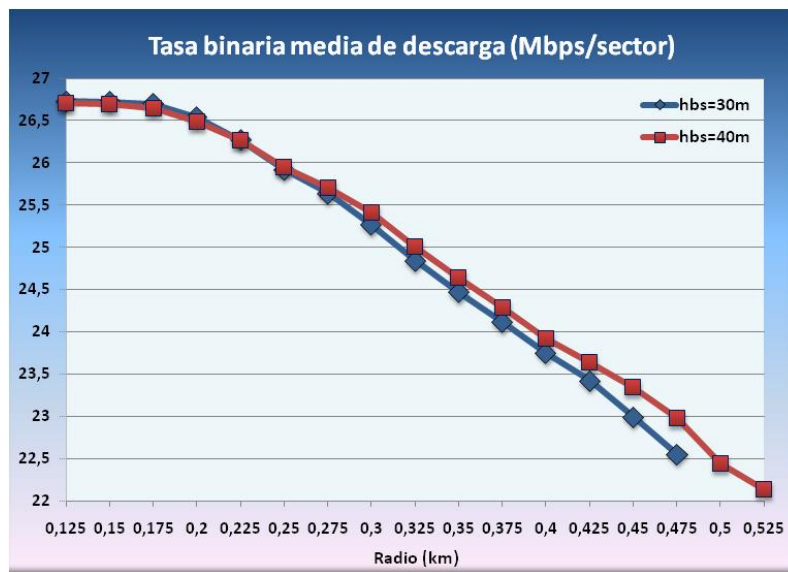


Figura 3- 48: Valor de tasa binaria media de descarga en un edificio de 4 plantas en una zona rural con una anchura de haz de 120°.

Se puede apreciar que el radio máximo de celda en las zonas rurales es mayor que para las zonas urbanas y suburbanas. También se puede observar que las diferencias entre la tasa binaria para una altura de 30 metros y para 40 metros son muy pequeñas en comparación con lo que ocurría en las zonas urbanas y suburbanas. Al encontrarnos en un área rural existen menos obstáculos que en zonas urbanas por lo que no cobra tanta importancia la altura de la estación base.

Es muy importante denotar que para una zona rural, independientemente de la anchura de haz y/o altura de la antena de la estación base, los usuarios no podrán disfrutar de la máxima tasa binaria media de descarga a ninguna altura del edificio ni a ninguna distancia de la estación base ya que no se obtiene el mínimo valor de SINR necesario, 24,4 dB, para aplicar la mayor modulación posible tal y como hemos visto en las gráficas de SINR para este apartado de zonas rurales, epígrafe 3.1.3.

3.2. Simulaciones de un sistema WiMAX multiceldas utilizando clúster de 7 celdas para la banda de 3.5 GHz para usuarios móviles.

En este segundo apartado del capítulo 3, se va a estudiar la tecnología WiMAX para usuarios móviles ubicados en vehículos con velocidades no superiores a 30 m/s, 120 km/h y con frecuencia 3.5 GHz. Estos usuarios, que disfrutan de movilidad, sufrirán el efecto *Doppler*⁴³ que depende de la velocidad del usuario, la frecuencia de trabajo y la separación entre las portadoras. Este efecto provoca interferencia inter-portadoras (Inter-Carrier Interference, ICI) causada por el desplazamiento de frecuencia (efecto Doppler) que provoca una reducción en la potencia en las portadoras. Esta interferencia debe ser tenida en cuenta en la fórmula para el cálculo de la relación señal a interferencias y ruido (SINR).

El valor de SINR teniendo en cuenta el efecto Doppler se calcula siguiendo la fórmula a continuación:

$$\text{SINR} = 10 \log_{10} \left(\frac{s}{n + 11 \cdot \sum_{k=1}^7 i_k + i_{\text{inter}}} \right) \quad (3.14)$$

Dónde s es la señal deseada, i_k son las señales interferentes e i_{inter} es la interferencia inter-portadoras (Inter-Carrier Interference, ICI). Esta interferencia se puede calcular aplicando la fórmula siguiente:

$$i_{\text{inter}} = 0.0296 \cdot s \quad (3.15)$$

Se simulan los resultados para alturas de la estación base de 30 metros y 40 metros y para anchura de haz de 60, 90 y 120 grados. Se incluye solo la gráfica correspondiente al mínimo valor de SINR para aplicar la menor modulación posible (BPSK), 6.4 dB, que da lugar al radio máximo de la celda permitido para que exista comunicación en cada uno de las áreas bajo estudio: urbana, suburbana y rural. El valor indicado es el mismo valor de SINR que para los usuarios de WiMAX portátil indoor, apartado 3.1, pero en este apartado tenemos en cuenta el efecto de la interferencia inter-portadoras para los usuarios móviles aplicando las ecuaciones 3.14 y 3.15. La altura de la estación receptora, antena del móvil conectado a WiMAX, tiene el valor de un metro de altura para todas las simulaciones.

Para los usuarios móviles las pérdidas de propagación son las debidas al modelo de pérdidas de propagación de Erceg, como para los usuarios fijos. Sin embargo, las pérdidas que existían en el caso de *indoor* debidas a la penetración en la fachada del edificio, que eran 10 dB, y las pérdidas por multitrayecto, 10 dB, se reducen a 6 dB por el vehículo; más 3 dB debido a las pérdidas por atravesar el cristal del vehículo y otros 3 dB a causa del multitrayecto.

⁴³ El efecto Doppler, llamado así por el austríaco Christian Doppler, es el aparente cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento de la fuente respecto a su observador. En el caso del espectro visible de la radiación electromagnética, si el objeto se aleja, su luz se desplaza a longitudes de onda más largas, desplazándose hacia el rojo. Si el objeto se acerca, su luz presenta una longitud de onda más corta, desplazándose hacia el azul. Esta desviación hacia el rojo o el azul es muy leve incluso para velocidades elevadas.

3.2.1. Zona urbana.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

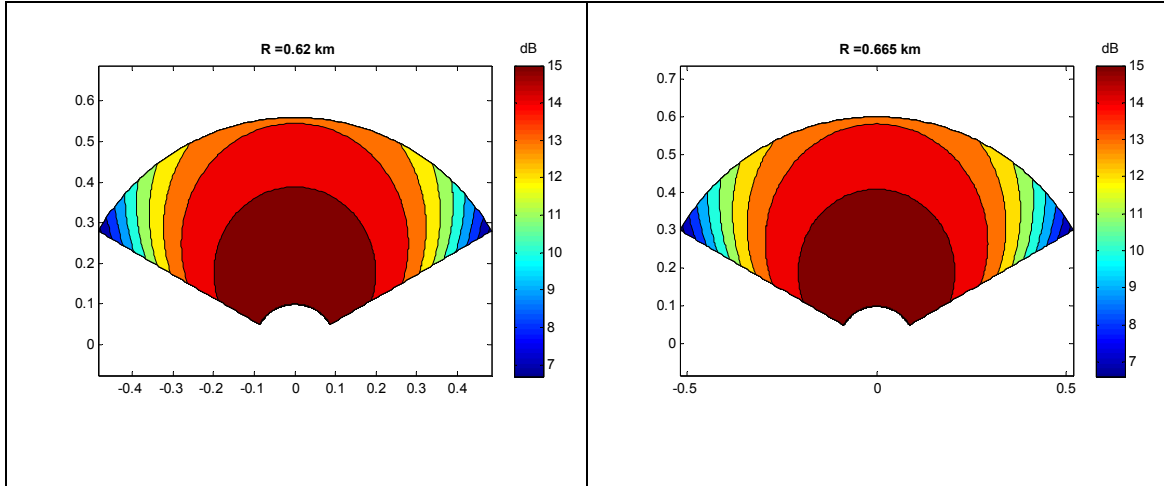


Figura 3- 49: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

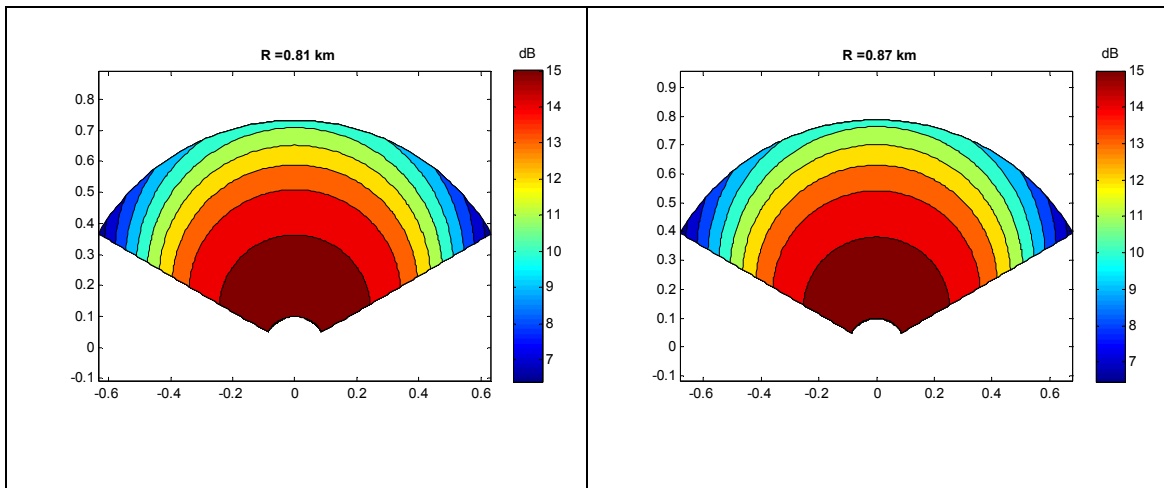


Figura 3- 50: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

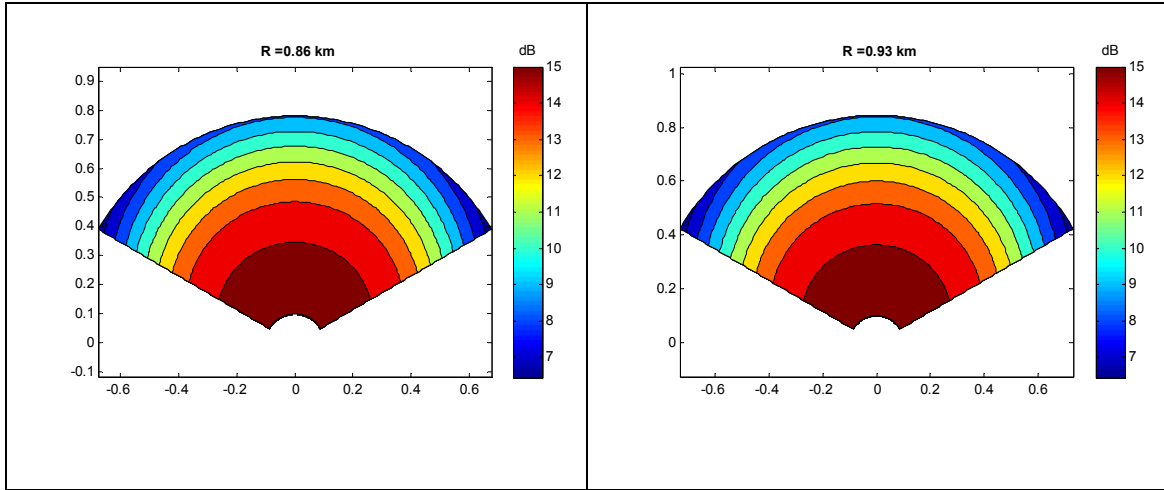


Figura 3- 51: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.2.1.1. Valores de tasa binaria de descarga.

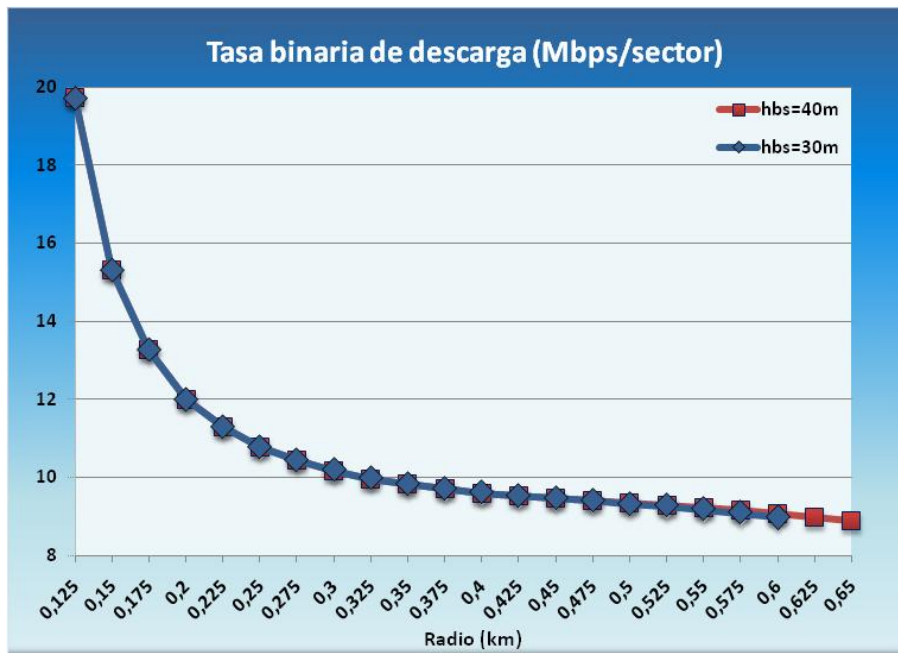


Figura 3- 52: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona urbana con una anchura de haz de 60°.

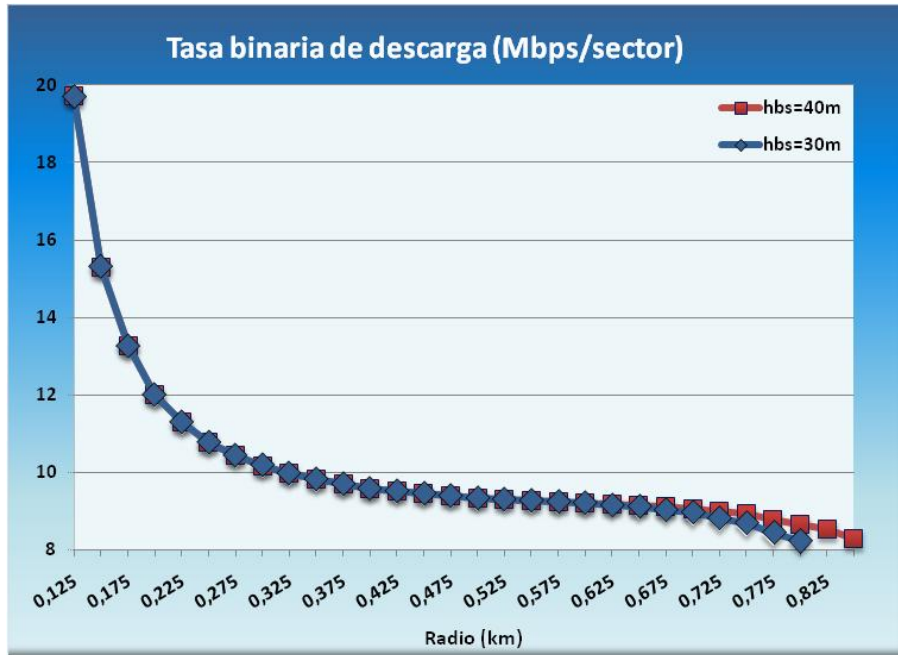


Figura 3- 53: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona urbana con una anchura de haz de 90°.

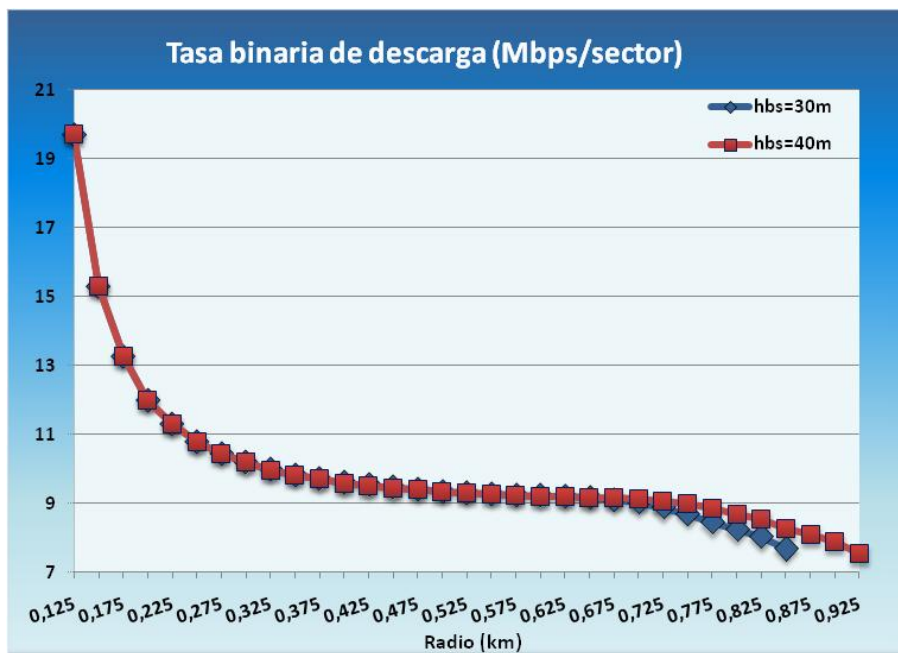


Figura 3- 54: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona urbana con una anchura de haz de 120°.

3.2.2. Zona suburbana.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

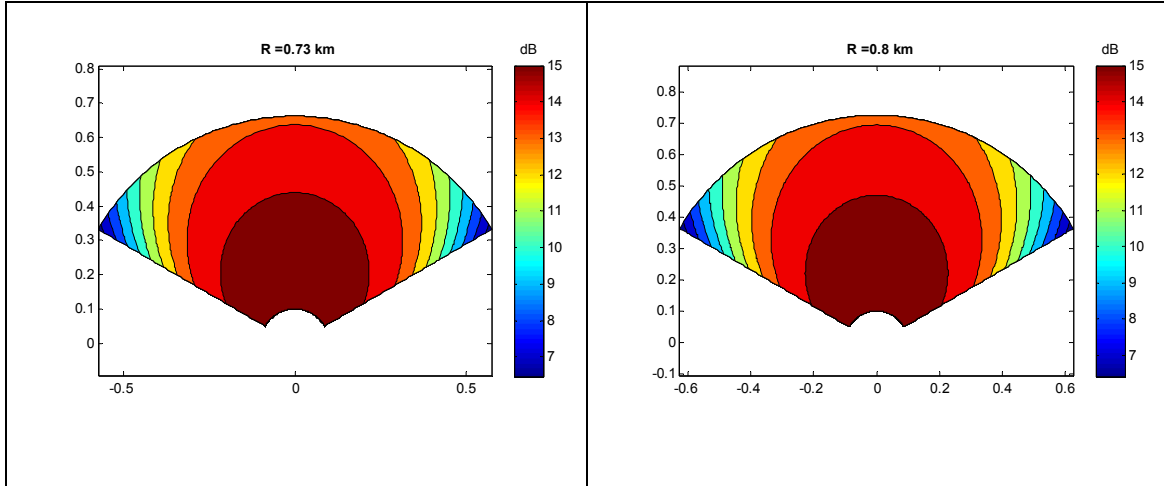


Figura 3- 55: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

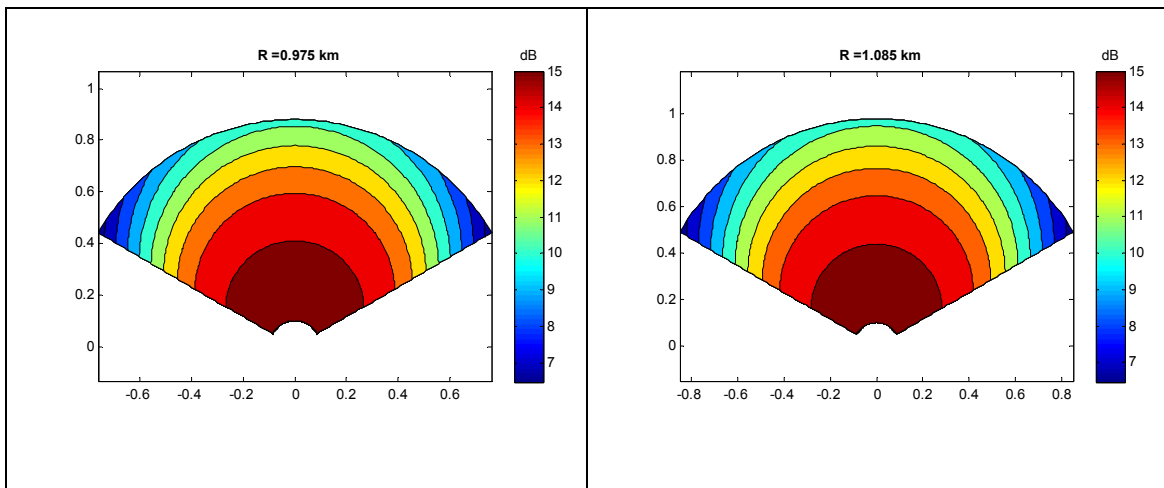


Figura 3- 56: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

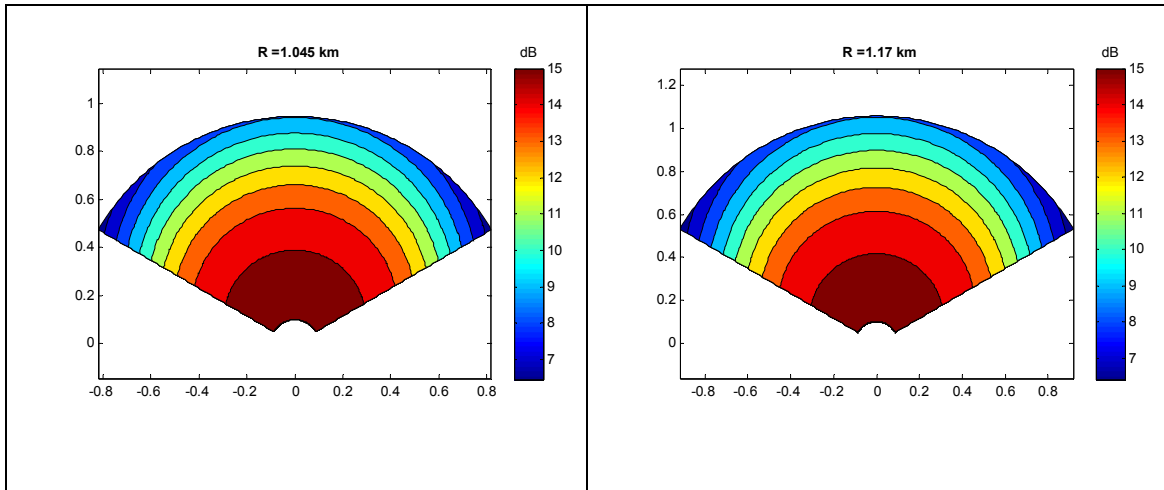


Figura 3- 57: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda.

3.2.2.1. Valores de tasa binaria de descarga.

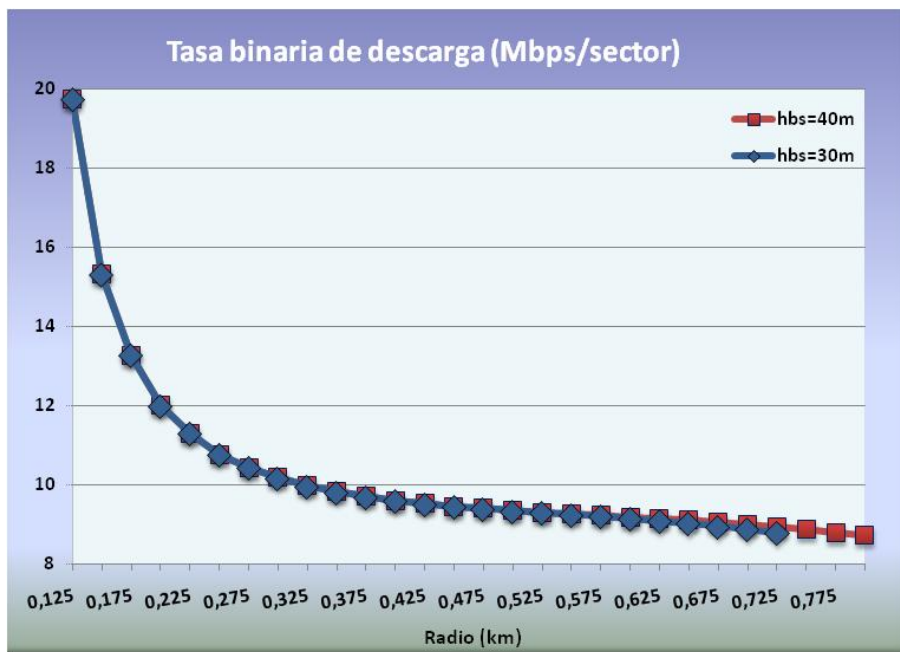


Figura 3- 58: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona suburbana con una anchura de haz de 60°.

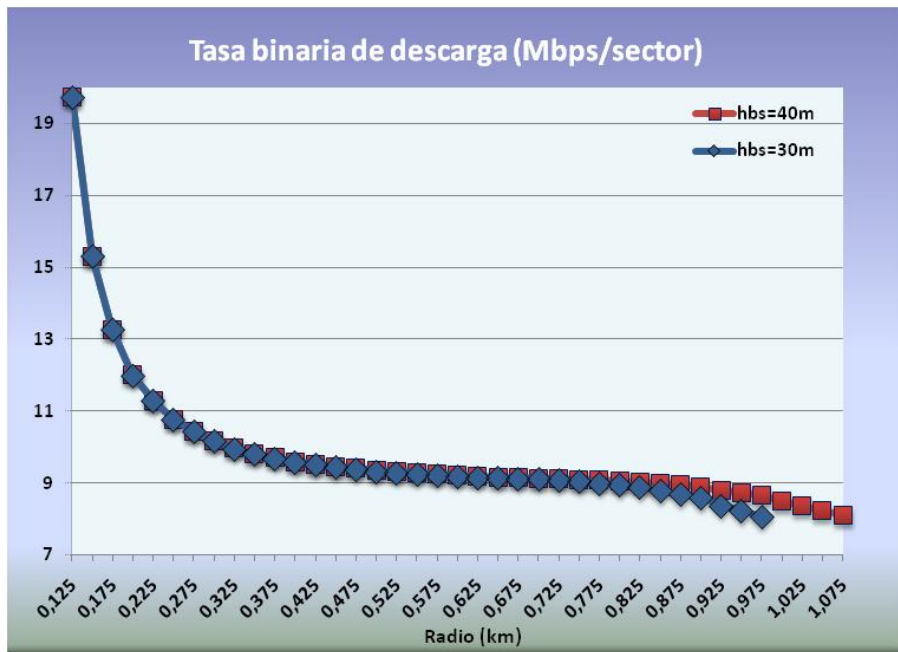


Figura 3- 59: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona suburbana con una anchura de haz de 90°.

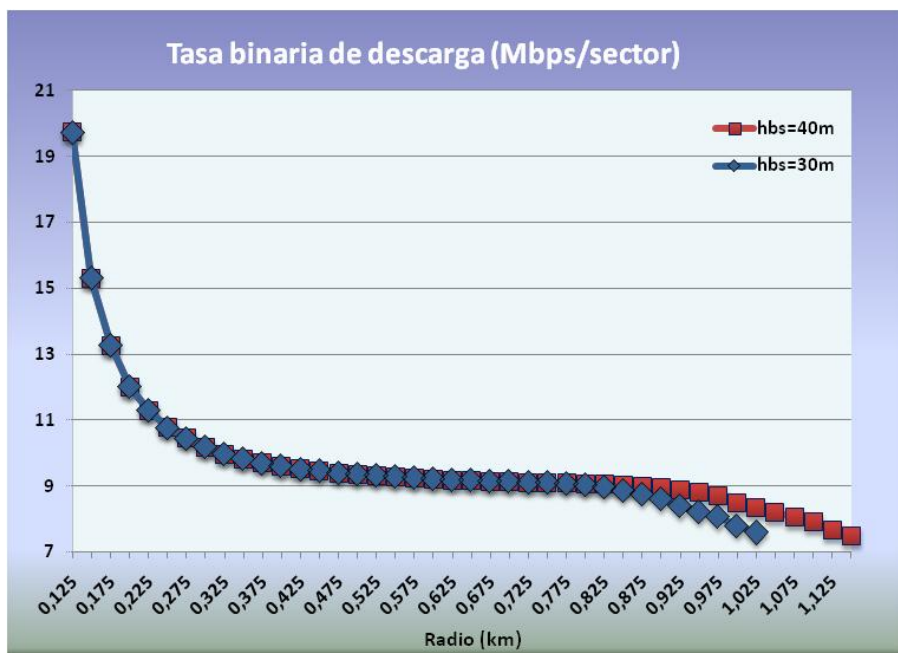


Figura 3- 60: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona suburbana con una anchura de haz de 120°.

3.2.3. Zona rural.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

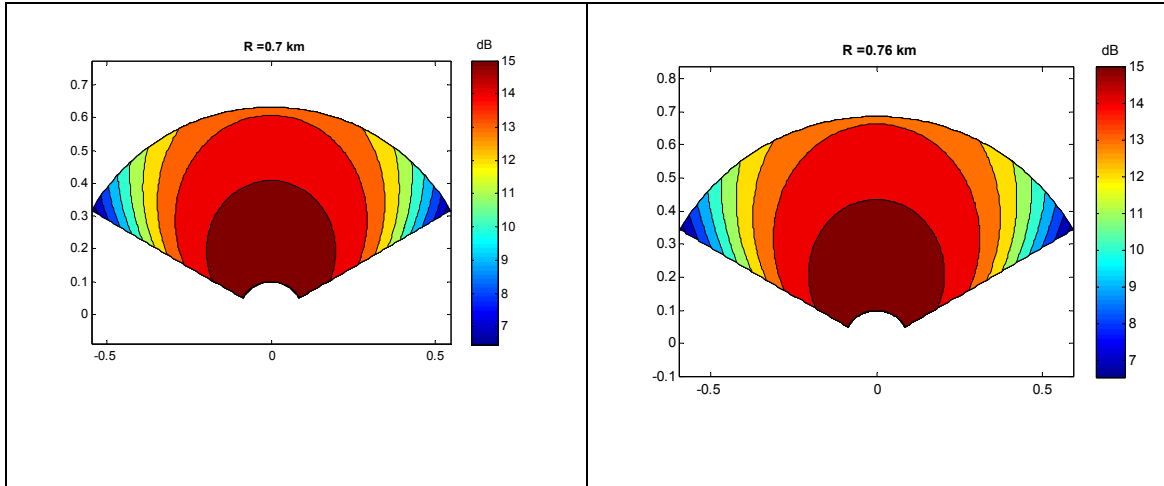


Figura 3- 61: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 60° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

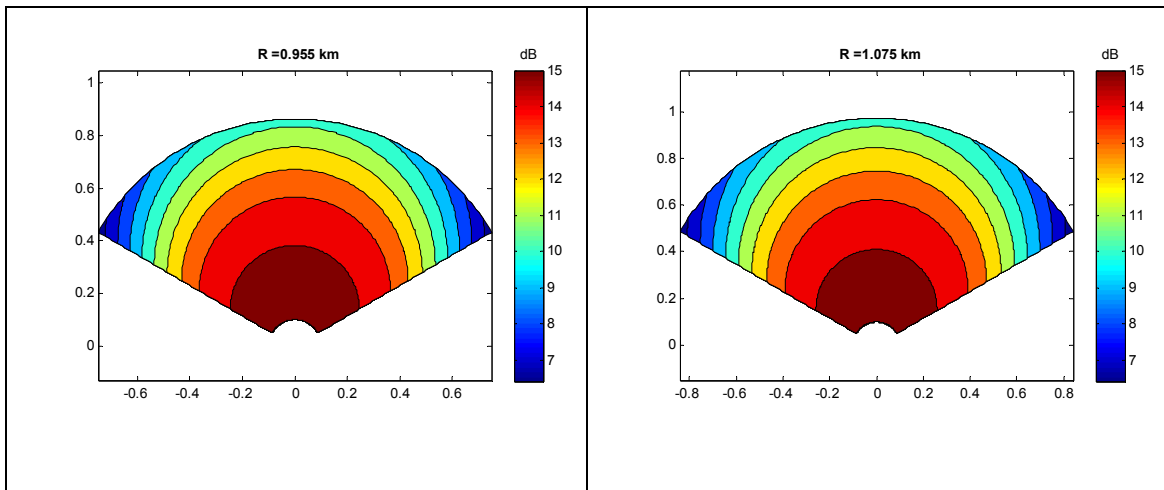


Figura 3- 62: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 90° para diferentes radios de celda.

Altura estación base = 30 m.

Altura estación base = 40 m.

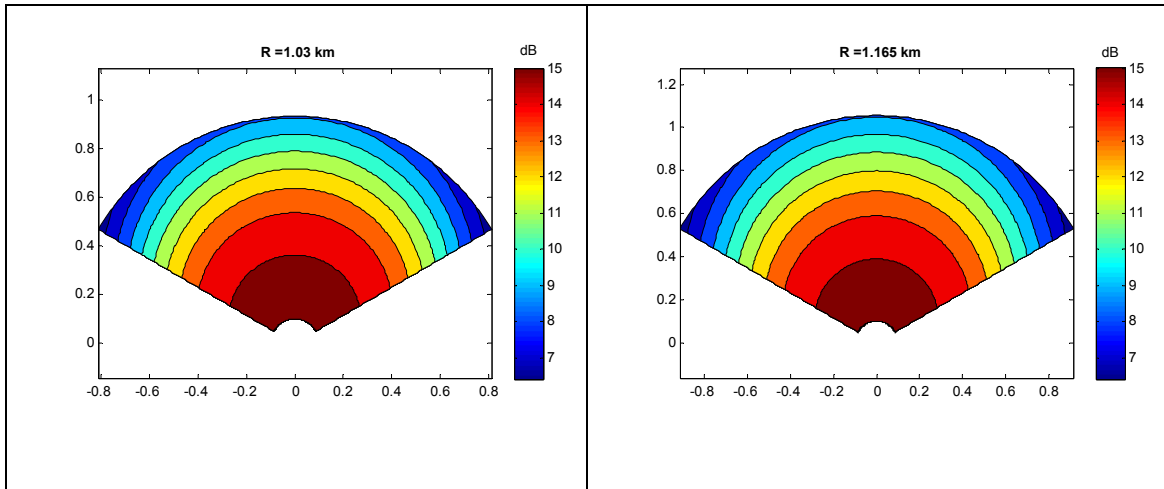


Figura 3- 63: Gráficas de SINR para sistemas receptores móviles con altura 1 m. y con anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda

3.2.3.1. Valores de tasa binaria de descarga.

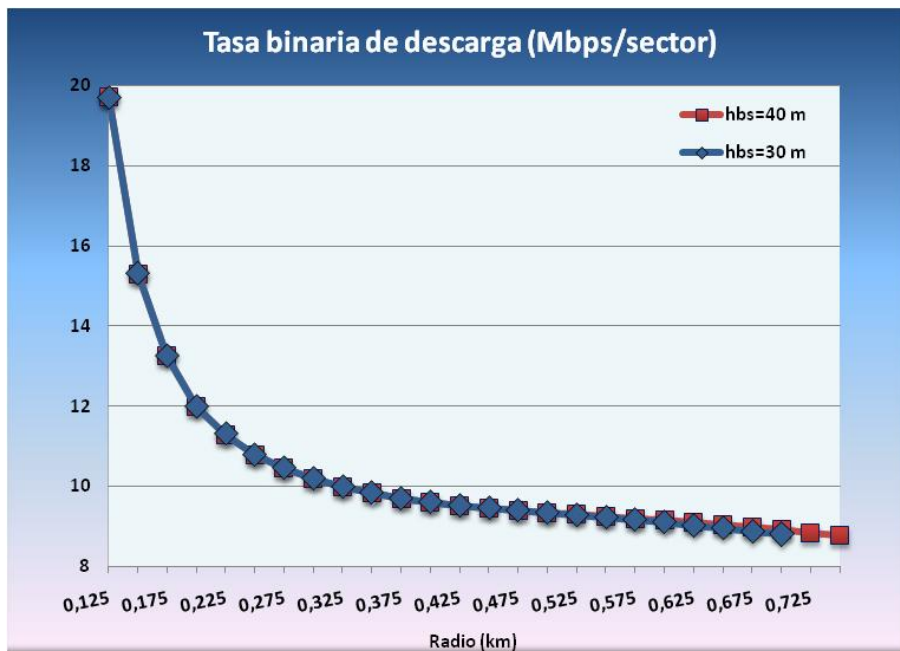


Figura 3- 64: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona rural con una anchura de haz de 60°.

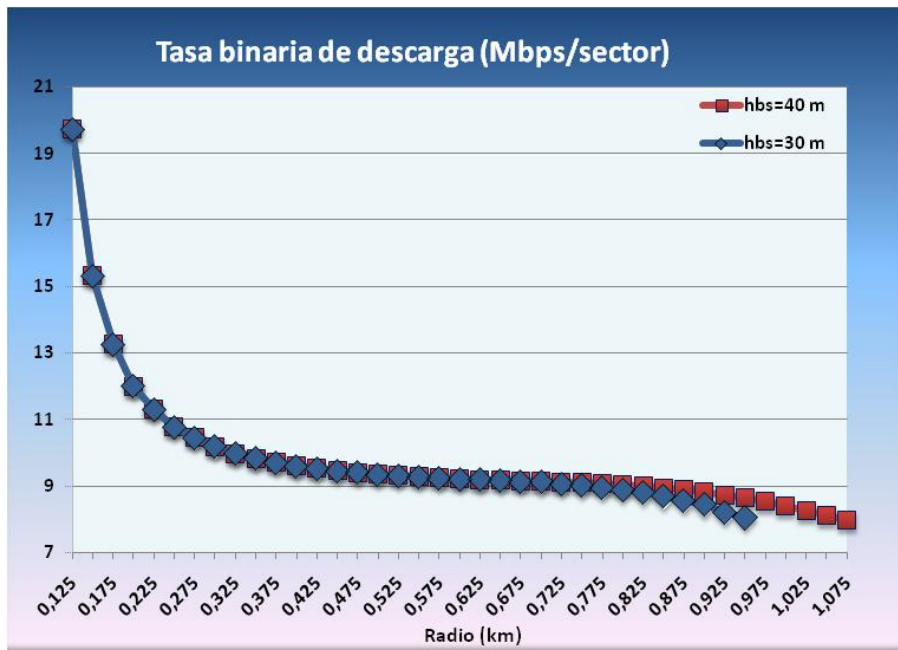


Figura 3- 65: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona rural con una anchura de haz de 90°.

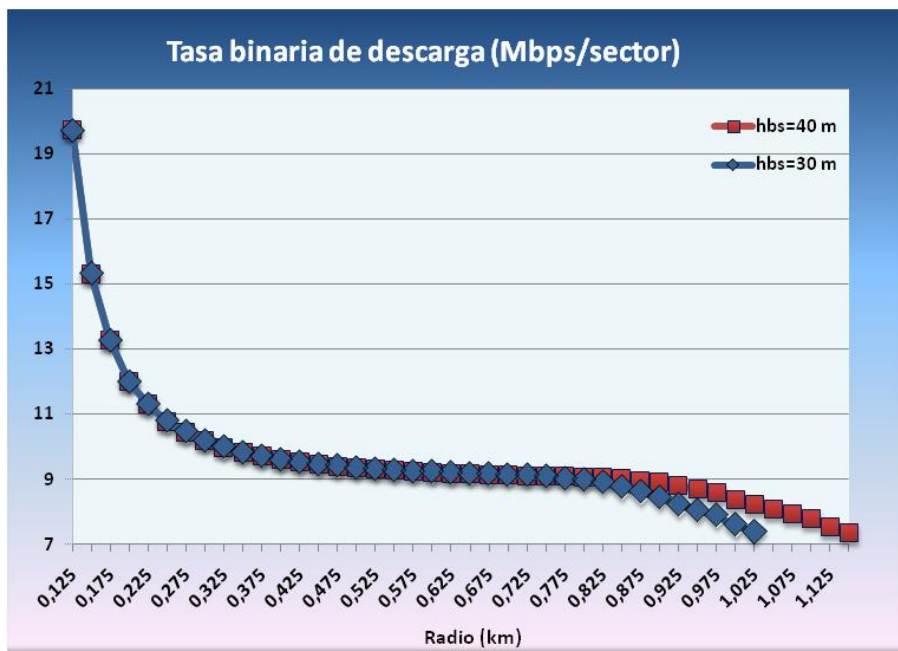


Figura 3- 66: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios móviles en una zona rural con una anchura de haz de 120°.

Nota: Las condiciones de velocidad y frecuencia simuladas, 120 km/h y 3,5 GHz, representan el peor caso posible del efecto Doppler. Si la frecuencia bajase a 2,5 GHz o la velocidad del usuario disminuyese, el efecto sería menor.

3.3. Simulaciones de un sistema WiMAX multiceldas utilizando clústeres de 7 celdas para la banda de 3.5 GHz para usuarios en un edificio con la señal y las interferencias atravesando la ventana del edificio.

Las simulaciones se han realizado en los tres entornos analizados anteriormente: urbano, suburbano y rural para una altura de la estación base de 40 metros y una anchura de haz de 120° en un edificio de cuatro alturas: 1 metro, 4 metros, 7 metros y 10 metros con la señal deseada y las señales interferentes atravesando una ventana del edificio cuyas pérdidas por penetración en interiores a través del cristal del edificio.

En este escenario, nos encontramos las pérdidas de propagación calculadas a través del modelo de pérdidas de propagación de Erceg junto con 3 dB de pérdidas por atravesar el cristal de las ventanas, más 10 dB de desvanecimiento por sombra (shadowing) y 10 dB debido a las pérdidas por multitrayecto.

Se presentan los resultados obtenidos para las tres zonas utilizadas en el apartado 3.1, áreas urbana, suburbana y rural, para una altura de estación base de 40 metros y anchura de haz de 120°. Las alturas de la estación suscriptora, para poder calcular la tasa binaria de descarga promedio en el edificio, son las mismas que en dicho apartado, 1, 4, 7 y 10 metros.

Se incluye solo la gráfica correspondiente al mínimo valor de SINR para aplicar la menor modulación posible (BPSK), 6.4 dB, que da lugar al radio máximo de la celda permitido para que exista comunicación en cada uno de las áreas bajo estudio: urbana, suburbana y rural. El valor indicado es el mismo valor de SINR que para los usuarios de WiMAX portátil indoor con la señal deseada y las señales interferentes atravesando la fachada del edificio, apartado 3.1.

3.3.1. Zona urbana.

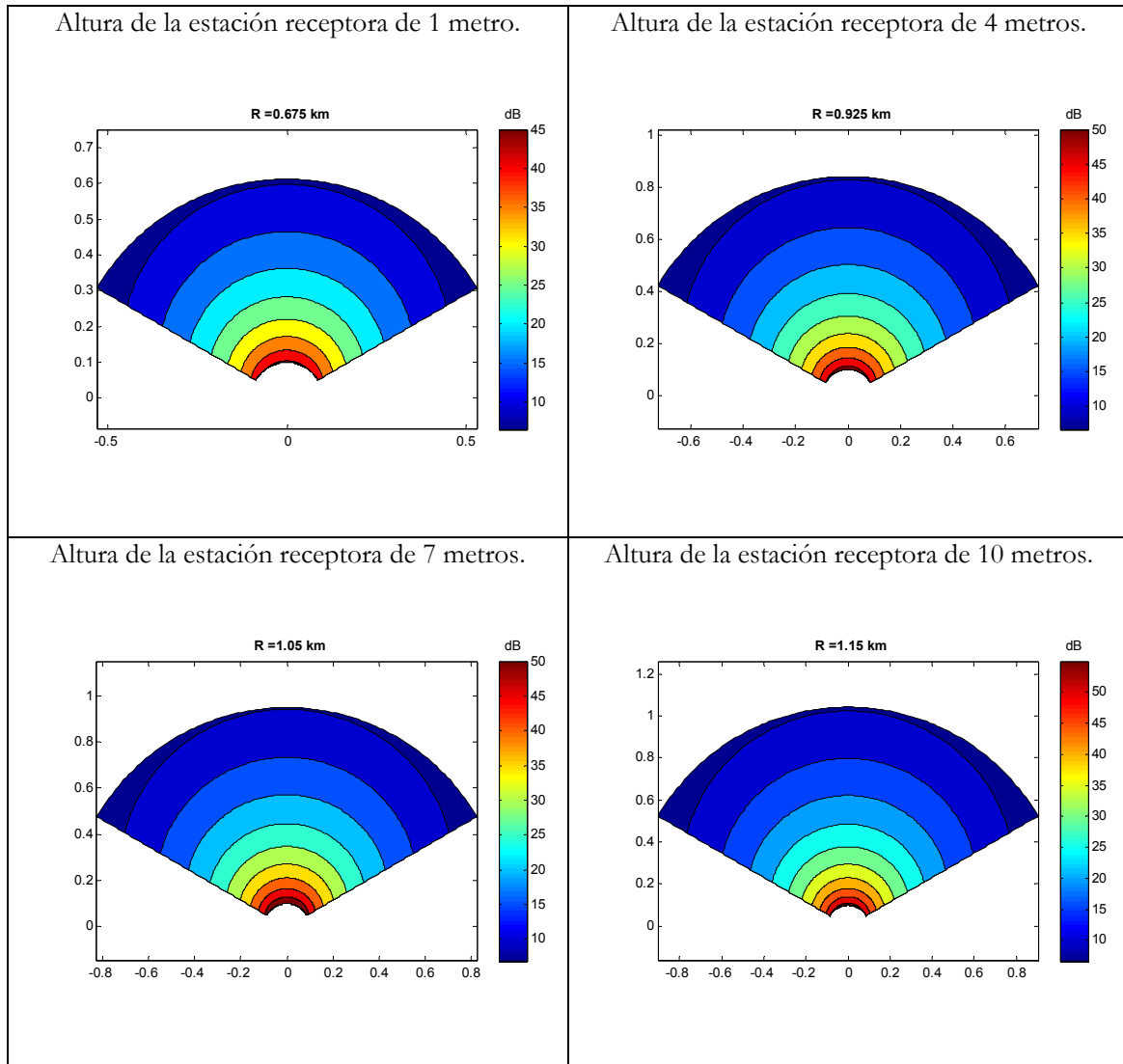


Figura 3- 67: Gráficas de SINR para sistemas receptores con la estación base de altura 40 metros y anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda en una zona urbana.

3.3.2. Zona suburbana.

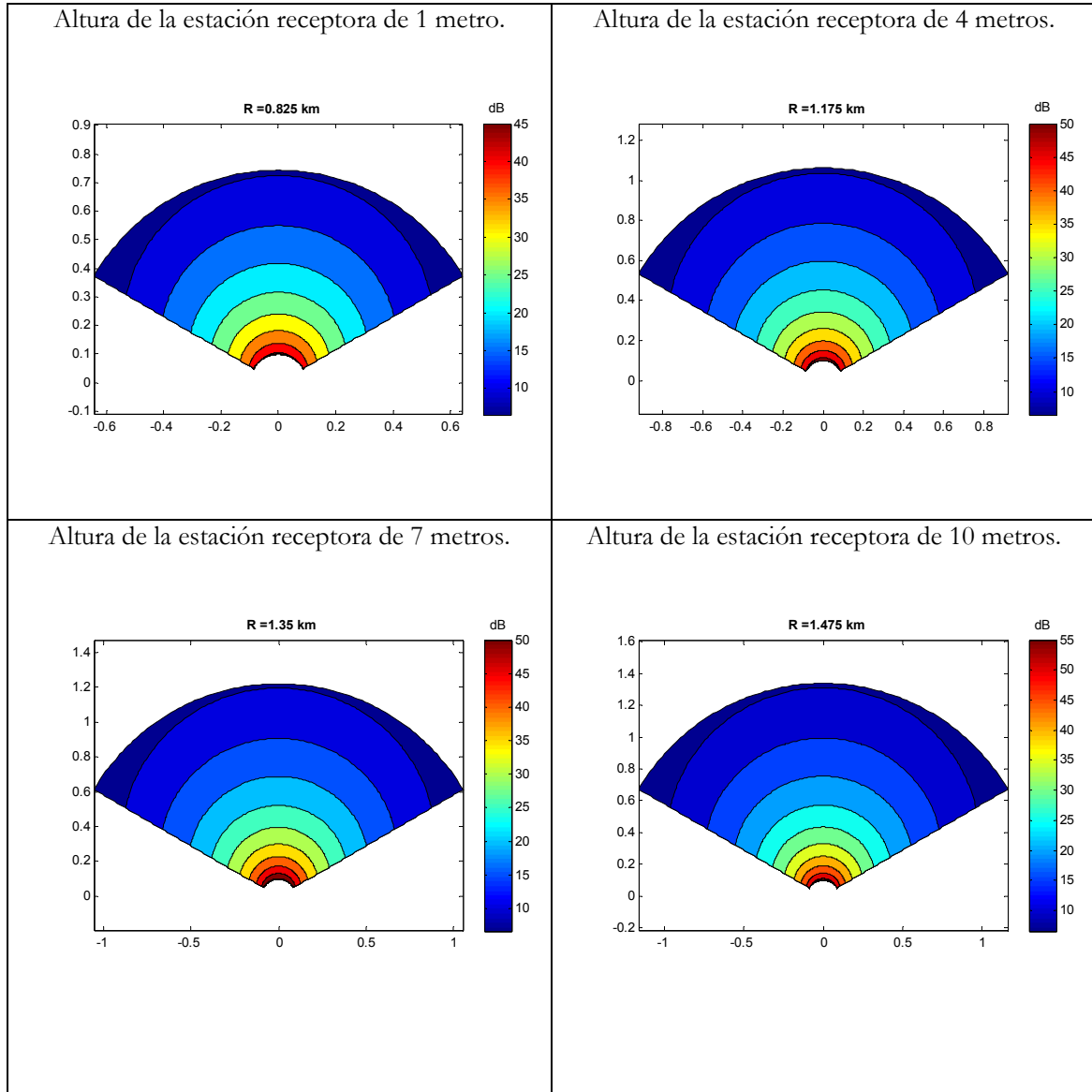


Figura 3- 68: Gráficas de SINR para sistemas receptores con la estación base de altura 40 metros y anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda en una zona suburbana.

3.3.3. Zona rural.

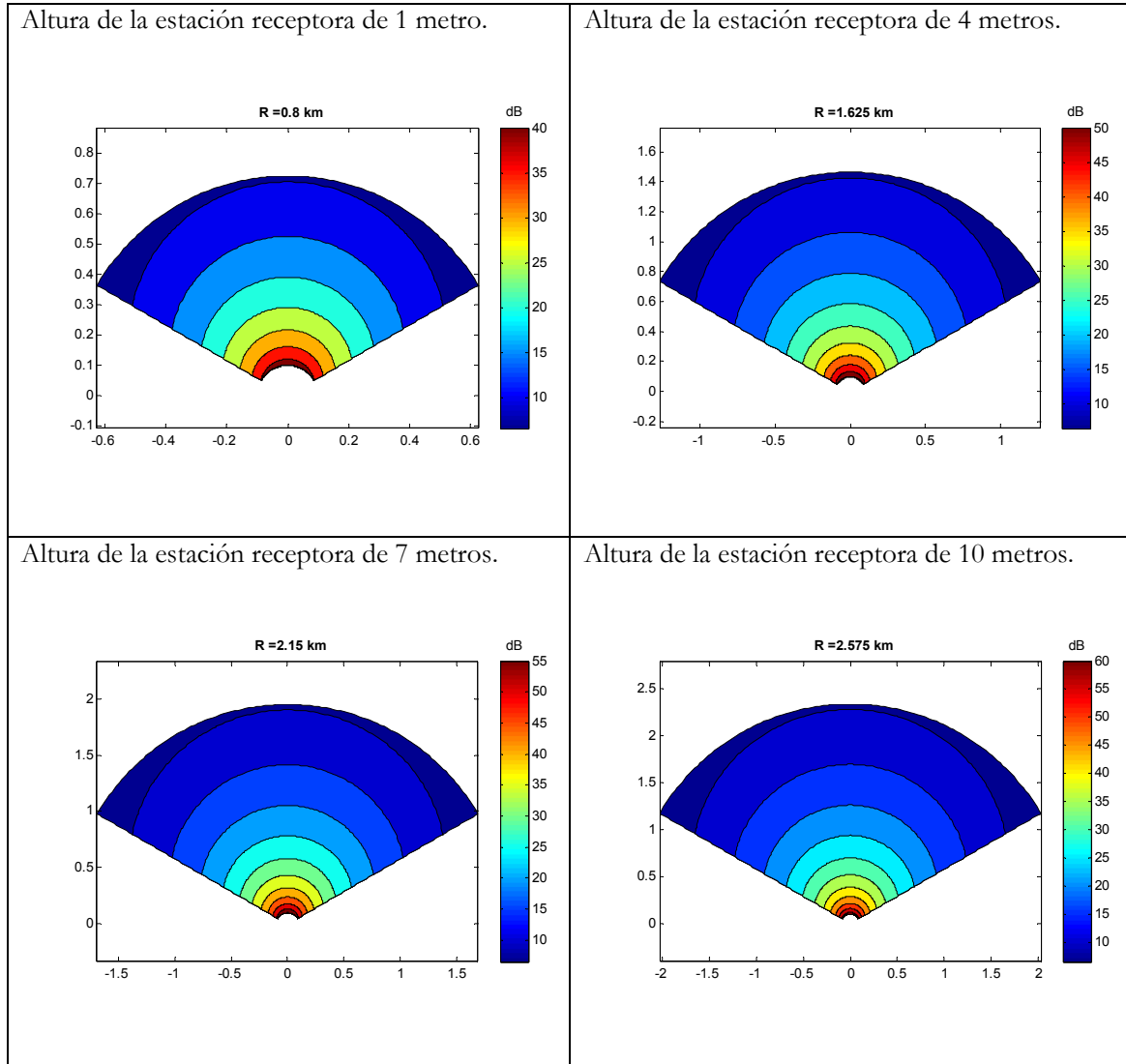


Figura 3- 69: Gráficas de SINR para sistemas receptores con la estación base de altura 40 metros y anchura de haz de 120° para diferentes radios de celda en una zona rural.

Como era de esperar, al ser menores las pérdidas de propagación en comparación con el caso del epígrafe 3.1, la señal deseada atravesando la fachada del edificio, obtenemos mayores radios de trabajo de la celda para los mismos valores de SINR necesarios para proporcionar un servicio a usuarios “deluxe”, que disfrutarán de la máxima tasa binaria de descarga, a usuarios medios y a usuarios no privilegiados, tendrán que conformarse con la mínima tasa binaria de descarga.

3.3.4. Tasas binarias medias de descarga para las tres zonas bajo estudio: urbana, suburbana y rural.

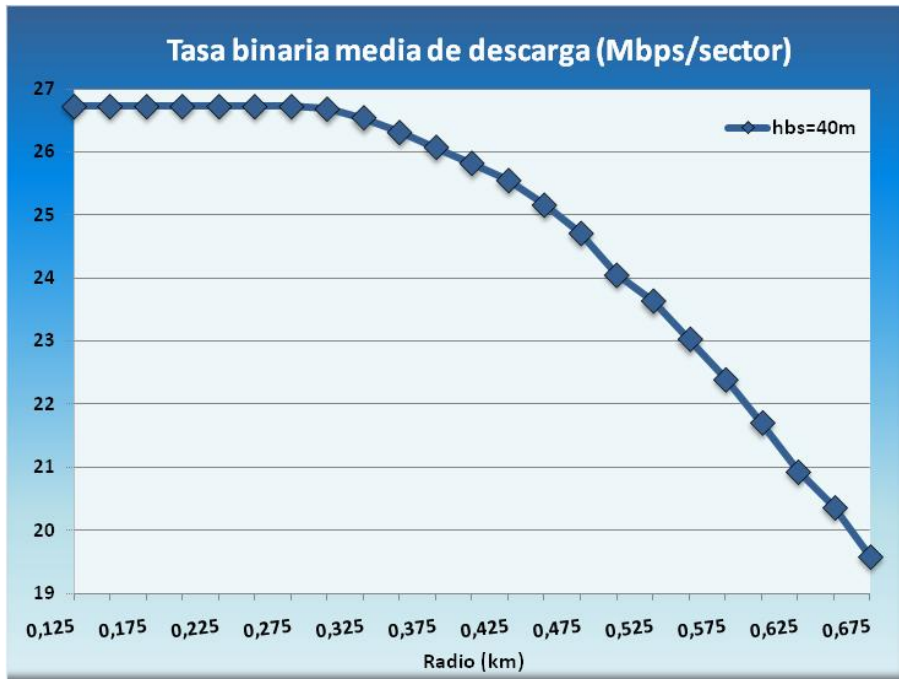


Figura 3- 70: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios en una zona urbana con altura de la estación base de 40 m y anchura de haz de 120°.

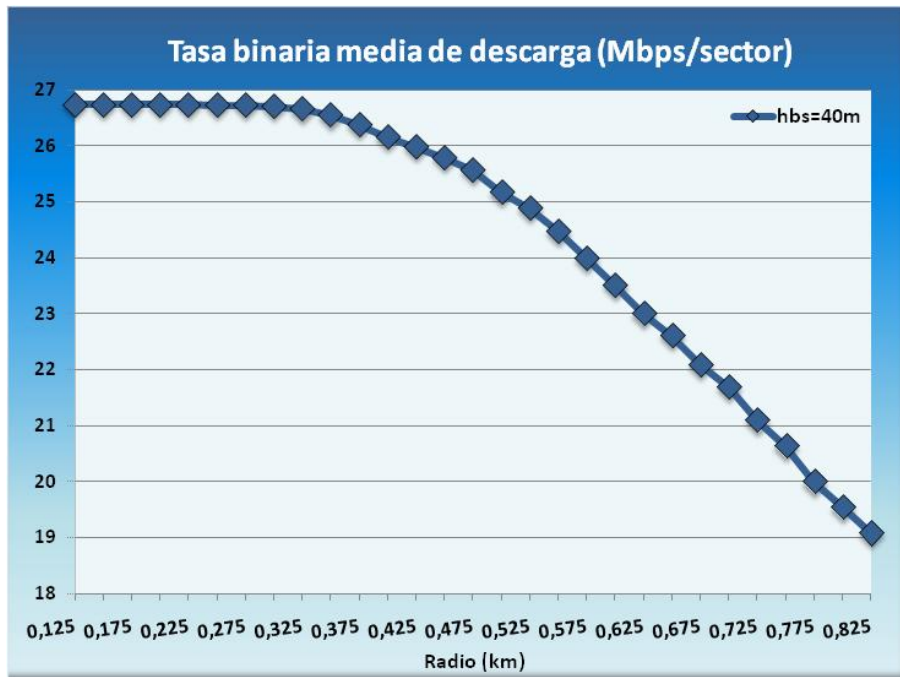


Figura 3- 71: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios en una zona suburbana con altura de la estación base de 40 m y anchura de haz de 120°.

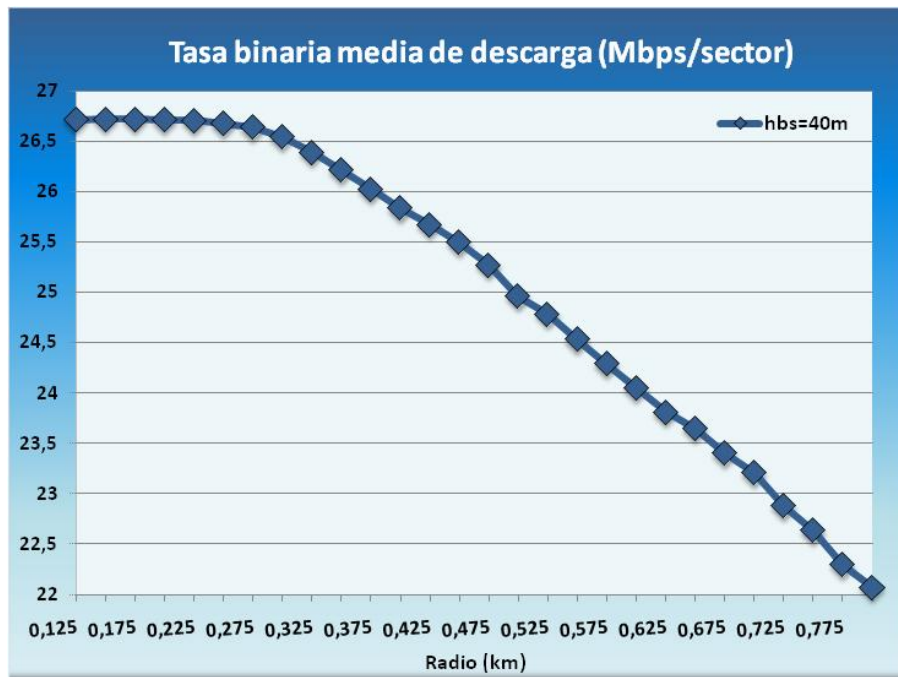


Figura 3- 72: Valor de tasa binaria de descarga para usuarios en una zona rural con altura de la estación base de 40 m y anchura de haz de 120°.

Como ocurría para otras simulaciones, obtenemos un radio de trabajo mayor en las zonas rurales respecto a las zonas urbanas y suburbanas. A su vez, el radio es mayor para las zonas suburbanas que para las zonas urbanas.

Cabe destacar que para una zona rural, con los parámetros seleccionados de anchura de haz 120° y altura de la antena transmisora de 40 metros, los usuarios no podrán disfrutar de la máxima tasa binaria media de descarga a ninguna altura del edificio ni a ninguna distancia de la estación base ya que no se obtiene el mínimo valor de SINR necesario, 24,4 dB, para aplicar la mayor modulación posible al igual que ocurría en el caso de simulación del epígrafe 3.1.

Por último, comentar que con la señal deseada atravesando el cristal se obtienen mayores tasas binarias de descarga que en el caso de la señal deseada a través de la fachada ya que al ser menores las pérdidas, el valor de SINR es mayor lo que permite el uso de mayores modulaciones.

3.4. Comparativa del radio máximo de trabajo de celda en los distintos escenarios de comunicaciones para sistemas WiMAX multiceldas utilizando clúster de 7 celdas en la banda de 3.5 GHz.

En este apartado realizaremos un estudio comparativo del máximo radio de trabajo de celda posible. Los escenarios que se van a equiparar son los siguientes:

- Tecnología WiMAX fijo (802.16d)⁴⁴.
- Tecnología WiMAX móvil (802.16e) para usuarios *indoor* portátil con la señal atravesando la fachada del edificio.
- Tecnología WiMAX móvil (802.16e) para usuarios *indoor* portátil con la señal atravesando el cristal del edificio.
- Tecnología WiMAX móvil (802.16e) para usuarios móviles.

En todos los casos se comparan los resultados obtenidos para los mismos parámetros: sistemas WiMAX multiceldas utilizando clústeres de 7 celdas en la banda de frecuencias de 3,5 GHz con múltiples interferencias cocanales en zonas urbanas, suburbanas y rurales, anchura de haz de 120° y altura de 40 metros para la estación base y altura de la estación suscriptora es de 1 metro (limitada por los usuarios móviles).

Escenario de comunicaciones	Radio máximo de trabajo de la celda (m)		
	Zona urbana	Zona suburbana	Zona rural
WiMAX fijo	2.100	2.900	3.600
WiMAX para usuario portátil (fachada)	450	500	525
WiMAX para usuario portátil (cristal)	675	825	800
WiMAX usuarios móviles	930	1.170	1.165

Tabla 3- 4: Comparación del radio máximo de trabajo de la celda para los diferentes escenarios WiMAX.

⁴⁴ Fuente: Enrique Carreras Paz, Trabajo fin de máster: “Sistemas WiMAX multiceldas”. Escuela Politécnica Superior, UAM. Septiembre 2009.

A simple vista existe una diferencia abismal entre los valores de radios máximos para WiMAX 802.16d y los de WiMAX 802.16e. Una de las diferencias más notables es la ganancia de la estación suscriptora: para WiMAX fijo, las antenas receptoras de la estación suscriptora son directivas, siempre apuntan hacia la estación base correspondiente a la celda donde se encuentren. Por lo tanto, la ganancia de la antena de recepción depende de los ángulos formados entre las estaciones bases interferentes y la estación suscriptora. Sin embargo, para WiMAX móvil las antenas receptoras son omnidireccionales con el mismo valor de ganancia tanto para la señal deseada como para las señales interferentes.

Analizando los tres escenarios simulados de la tecnología WiMAX *Mobile* podemos observar que los menores radios de celda se corresponden con el escenario *indoor* para usuarios portátiles con la señal deseada y las interferencias atravesando la fachada del edificio, apartado 3.1 de este proyecto. Este hecho se debe a que las pérdidas de propagación son mayores para este caso debido a las pérdidas por penetración en interiores. Por el contrario, los mayores radios se obtienen para los usuarios ubicados en vehículos móviles ya que las pérdidas son menores aunque se ven afectados por el efecto Doppler, epígrafe 3.2.

Los resultados de la SINR varían en dependencia del terreno para el cual se instale un sistema WiMAX, si el terreno es llano y con pocas elevaciones menores serán las interferencias, por lo que se obtiene una mayor SINR. Comparando las diferentes zonas, los menores radios de celda se obtienen en las zonas urbanas ya que las pérdidas de propagación son mayores debido a los obstáculos existentes en las ciudades como edificios, rascacielos...

Capítulo 4

Aplicaciones WiMAX: análisis de resultados en diferentes zonas urbanas.

4.1. Consideraciones para la aplicación WiMAX.

Para lograr un análisis de cada zona en particular que se ajuste a la realidad, es necesario tener en cuenta elementos fundamentales a la hora de determinar la cantidad de celdas necesarias para cubrir una zona específica, como son las características demográficas de cada lugar, así como el factor de penetración de las mismas. Estas serán descritas en esta sección junto con algunas consideraciones que se consideren necesarias. Los escenarios escogidos para el estudio fueron Madrid-Barcelona y Bagdad-Mosul, cuyo emplazamiento se muestra en el mapa de la Figura 4-1, atendiendo principalmente a algunas características similares entre ellos, así como el hecho de estar ubicados en diferentes áreas geográficas; de las simulaciones realizadas se escogieron para su análisis las que poseen una altura de la estación base de 40 metros y una anchura de haz de 120 grados, ya que con estos datos se obtienen los mejores resultados. En las ciudades se utilizan los resultados obtenidos en el capítulo 2 para clústeres de 7 celdas en la banda de 3.5 GHz.

Por último destacar que en todas las localidades la aplicación WiMAX se aplica para un escenario de interiores (*indoor*) y para un escenario de WiMAX móvil por lo que el radio de la celda no supera los 925 metros así que se estimó necesario modificar la anchura de banda por sector de 10 MHz a 1,25 MHz para obtener resultados coherentes. La aplicación se ha diseñado para dos requisitos de tasa de bajada: 50 Mbyte diario por usuario o 100 Mbyte, mostrándose ambos resultados.



Figura 4- 1: Mapa con la ubicación de las ciudades elegidas para la aplicación de WiMAX.

En todos los casos la SINR corresponde a un sistema multiceldas con múltiples interferencias cocanal, tal y como se ha explicado en el capítulo 3 de este proyecto:

$$SINR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{s}{n + 1.1 \cdot \sum_{k=1}^B t_k} \right) \quad (4.1)$$

4.1.1. Cálculo de la cantidad de celdas necesarias según la superficie.

La superficie total de una celda (STC) se define como sigue, donde R es el radio de la celda:

$$STC = 2,6 \cdot R^2 \quad (4.2)$$

La cantidad de celdas necesarias (CCN) para cubrir la superficie total de un terreno (STT) es:

$$CCN = STT / STC \quad (4.3)$$

4.1.2. Cálculo de la cantidad de celdas necesarias según la población.

Otro criterio importante a tener en cuenta para determinar el número de celdas es la población, partimos de la información sobre la densidad de población de cada localidad y el número de familias asociadas; se supone que, en media, cada familia está compuesta por no más de 4 personas, por lo que se tiene:

$$\# \text{ Familias} = \text{Número de habitantes} / 4 \quad (4.4)$$

Otro elemento a considerar para el cálculo de las celdas necesarias es el **factor de penetración** (FP), que varía en cada lugar de acuerdo al desarrollo tecnológico alcanzado. Este factor es un valor aproximado, por lo que la descarga total diaria (DT) necesaria para cada localidad según el número de habitantes se puede determinar de la siguiente manera:

$$DT = \# \text{ Familias} \cdot FP \cdot \text{Requisito} \quad (4.5)$$

Dónde **Requisito** es el valor de 50 MB/diario o 100 MB/diario que se establece en las simulaciones.

Por último la cantidad de celdas necesarias según la población (CCSP) queda definido por:

$$CCSP = DT / DC \quad (4.6)$$

Donde **DC** es la bajada diaria por celda que se obtiene según la siguiente fórmula:

$$\mathbf{DC = T_{bin\ media} (MBs/celda) \cdot 60\ s/minutos \cdot 60minutos/hora \cdot 20horas/día} \quad (4.7)$$

Dónde $T_{bin\ media}$ es el valor de tasa binaria media obtenido en el capítulo 3 para el escenario urbano, con anchura de haz de la antena de la estación base 120° y altura 40 metros. Dado que en este capítulo la anchura de banda del canal es de 1,25 MHz y sin embargo, en las simulaciones del capítulo 3 el valor de ancho de banda es 10 MHz por lo que debemos aplicar un factor de 1/8 a los valores medios de tasa binaria para obtener la tasa binaria media a utilizar.

$$\mathbf{T_{bin\ media} (MBs/celda) = T_{bin} (Mbps/sector) \cdot 3\ celdas/sector \cdot 1MB/8Mb \cdot (1/8)} \quad (4.8)$$

Para la aplicación de WiMAX destinada a los usuarios móviles, definidos como aquellos habitantes de una población que se conectan con los sistemas WiMAX disfrutando de movilidad (pasajeros de automóviles, autobuses...), se considera que el número de usuarios móviles se corresponde con el 5% del total de la población de cada localidad analizada.

4.2. Escenario Madrid-Bagdad.

4.2.1. Municipio de Madrid.

Madrid es la capital de España de la Comunidad de Madrid y de la provincia homónima es la ciudad más grande y poblada del país, alcanzando oficialmente los 3.213.271 habitantes dentro de su municipio, mientras que la cifra oficial del padrón a 1 de enero de 2009 es de 3.273.006 según el ayuntamiento y de 6.043.031 habitantes en su área metropolitana. El cálculo de las celdas necesarias para ofrecer cobertura utilizando un sistema WiMAX multiceldas a la Comunidad de Madrid se realizará para su municipio cuya superficie es de 605,8 km².



Figura 4- 2: Imagen panorámica de la ciudad de Madrid.

Población total	3.273.000 habitantes
Superficie (STT)	605,8 km ²
Factor de penetración (FP)	0,75

Tabla 4- 1: Datos de la ciudad de Madrid para el cálculo del número de celdas necesarias.

4.2.1.1. Planificación de WiMAX *indoor*.

4.2.1.1.1. Resultados para requisito del usuario de descarga de 50 Mbyte y 100 Mbyte diaria.

Siguiendo las formulas (1) y (2) expuestas en el epígrafe 4.1.1 de este capítulo se obtienen el número de celdas necesarias para dar cobertura a la ciudad de Madrid de acuerdo con la superficie de la zona. Este valor está representado con el color azul en la Figura 4-3. A su vez, en la misma figura se expone en color rojo la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para una tasa de descarga diaria de 50 MBytes por usuario y en color verde la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para un una tasa de descarga diaria de 100 MBytes por usuario, valores obtenidos a través de las fórmulas del epígrafe 4.1.2.

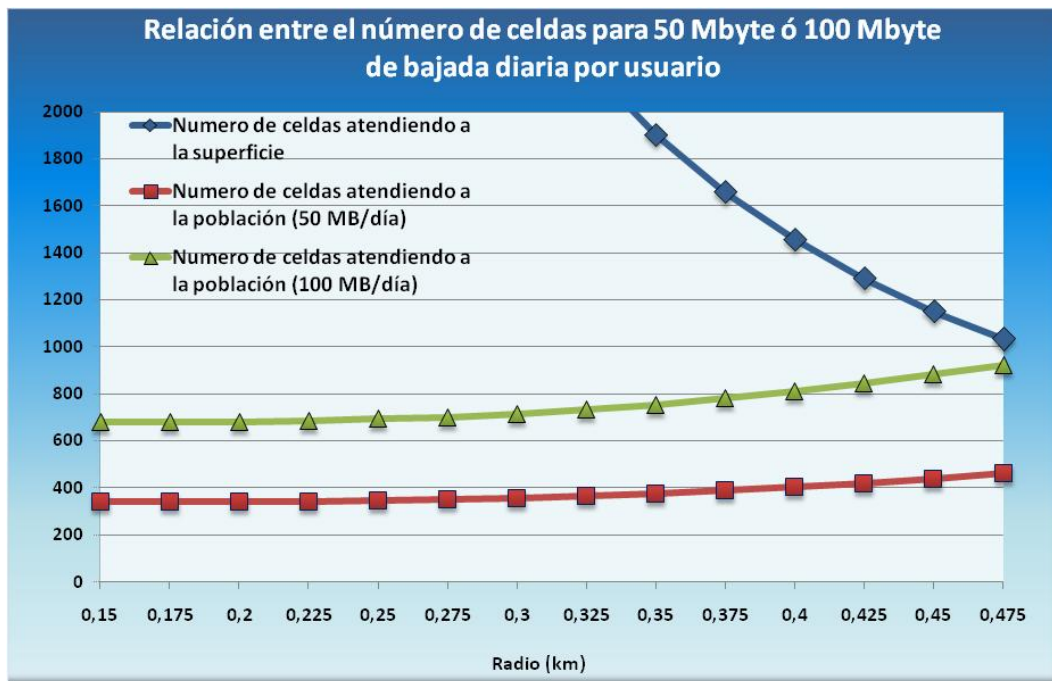


Figura 4- 3: Relación entre el número de celdas por superficie y el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Madrid.

En la figura anterior podemos apreciar que para un requisito de descarga de 50 Mbyte el valor de la relación entre el número de celdas por superficie y la cantidad de celdas por población con un tráfico de pico a promedio de 3 se corresponde con 1.290 celdas aproximadamente para un radio de 425 metros. Por otro lado, para un requisito de 100 Mbyte el valor de la relación entre el número de celdas por superficie y la cantidad de celdas por población con un tráfico de pico a promedio de 2 se corresponde con 1.657 celdas aproximadamente para un radio de 375 metros.

4.2.1.2. Planificación de WiMAX móvil.

Siguiendo las formulas (1) y (2) expuestas en el epígrafe 4.1.1 de este capítulo se obtienen el número de celdas necesarias para dar cobertura a la ciudad de Madrid con un factor de penetración del 5% de acuerdo con la superficie de la zona, dibujado en azul en la siguiente figura. Asimismo, se expone en color rojo la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para una tasa de descarga diaria de 50 MBytes por usuario y en color verde la cantidad de celdas necesaria para una tasa de descarga diaria de 100 MBytes por usuario.

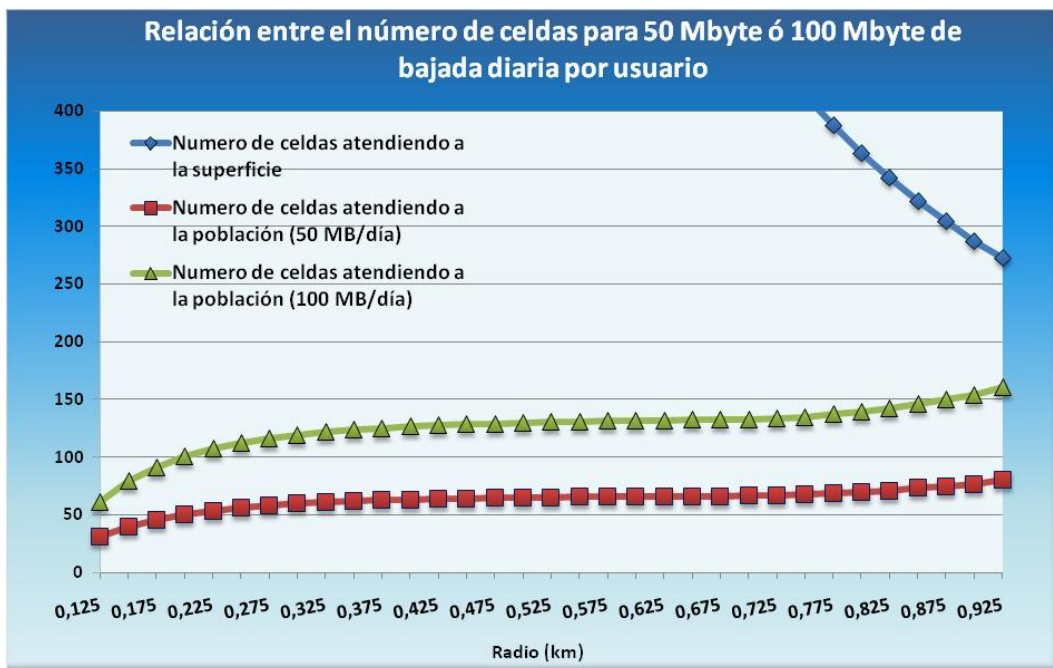


Figura 4- 4: Relación entre el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario móvil para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Madrid.

En la figura podemos deducir que el número de celdas calculado será 304 celdas con un radio de 875 metros, consiguiendo un valor de tráfico de pico a promedio de 2 para un requisito de 100 MBytes de descarga diaria.

4.2.2. Municipio de Bagdad.

Bagdad (Baghdad, en inglés) es la capital de Iraq, siendo también la ciudad más grande del país, con 6.431.839 habitantes (estimación del año 2008) y una de las más pobladas de Oriente Medio después de El Cairo y Teherán con una superficie de 1.134 km².



Figura 4- 5: Norte de Bagdad junto al río Tigris.

Población total	6.432.000 habitantes
Superficie (STT)	734 km ²
Factor de penetración (FP)	0,6

Tabla 4- 2: Datos de la ciudad de Bagdad para el cálculo del número de celdas necesarias.

4.2.2.1. Planificación de WiMAX indoor.

4.2.2.1.1. Resultados para requisito del usuario de descarga de 50 Mbyte y 100 Mbyte diaria.

Siguiendo las formulas (1) y (2) expuestas en el epígrafe 4.1.1 de este capítulo se obtienen el número de celdas necesarias para dar cobertura a la ciudad de Bagdad de acuerdo con la superficie de la zona. Este valor está representado con el color azul en la Figura 4-6. A su vez, en la misma figura se expone en color rojo la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para un una tasa de descarga diaria de 50 MBytes por usuario y en color verde la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para una tasa de descarga diaria de 100 MBytes por usuario, valores obtenidos a través de las fórmulas del epígrafe 4.1.2.

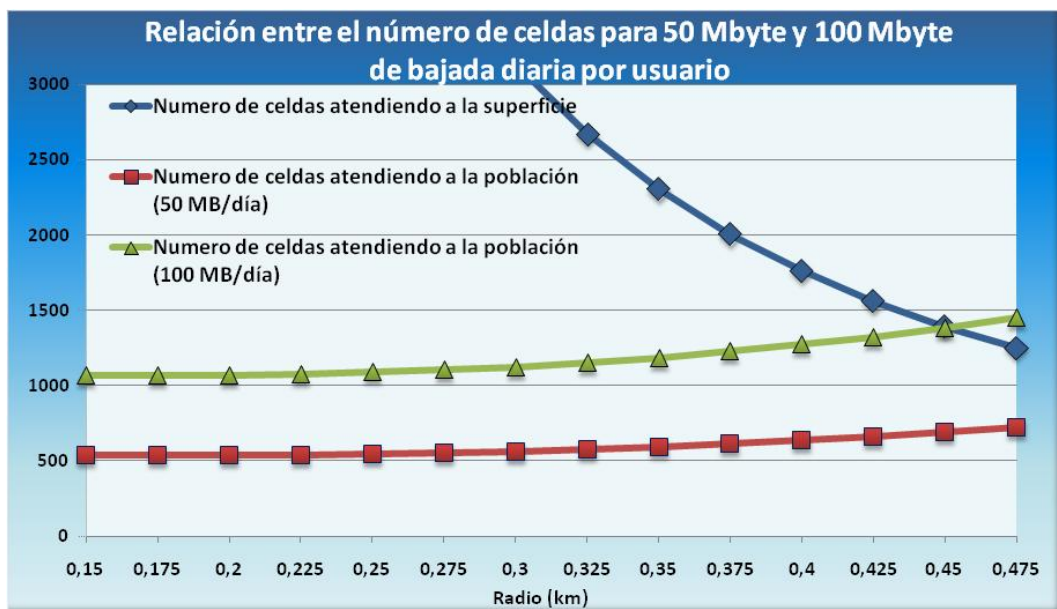


Figura 4- 6: Relación entre el número de celdas por superficie y el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Bagdad.

En la figura anterior podemos apreciar que para un requisito de 50 MBytes el valor de la relación entre el número de celdas por superficie y la cantidad de celdas por población con un tráfico de pico a promedio de 2 se corresponde con 1.394 celdas aproximadamente para un radio de 450 metros mientras que para un requisito de 100 Mbyte se corresponde con 2.305 celdas aproximadamente para un radio de 350 metros.

Para la ciudad de Bagdad, debido a su gran población, el radio de la celda con una bajada diaria de 100 MB por usuario será 450 metros para un tráfico de pico a promedio de 1 (aunque se trata del valor óptimo es prácticamente imposible).

4.2.2.2. Planificación de WiMAX móvil.

Siguiendo las formulas (1) y (2) expuestas en el epígrafe 4.1.1 de este capítulo se obtienen el número de celdas necesarias para dar cobertura a la ciudad de Bagdad con un factor de penetración del 5% de acuerdo con la superficie de la zona, dibujado en azul en la siguiente figura. También se expone en color rojo la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para una tasa de descarga diaria de 50 MBytes por usuario y en color verde la cantidad de celdas necesaria para una tasa de descarga diaria de 100 MBytes por usuario.

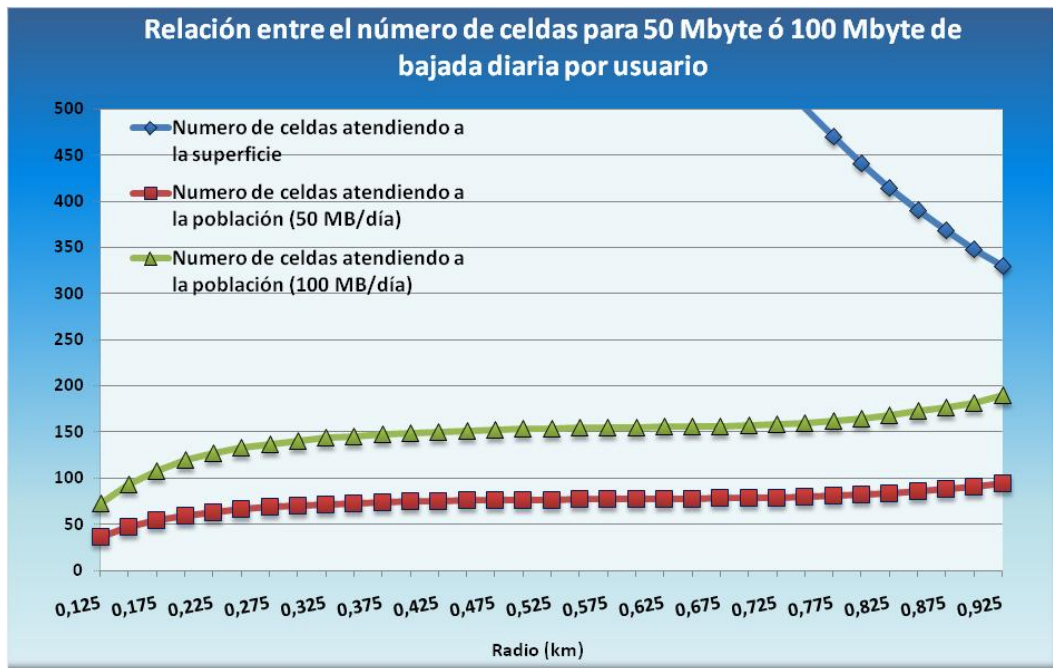


Figura 4- 7: Relación entre el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario móvil para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Bagdad.

Observando la Figura 4-7 podemos deducir que el número de celdas estimado será 369 celdas para un radio de 875 metros, consiguiendo un valor de tráfico de pico a promedio de 2 para un requisito de 100 MBytes de descarga diaria.

4.3. Escenario Barcelona-Mosul.

4.3.1. Municipio de Barcelona.

Barcelona es una ciudad situada en el nordeste de España, capital de Cataluña, de la provincia homónima y de la comarca del Barcelonés. Se ubica a orillas del mar Mediterráneo, unos 120 km al sur de la cadena montañosa de los Pirineos y de la frontera con Francia. Barcelona es la segunda ciudad española más poblada y la décima de la Unión Europea. Con una población de 1.621.537 habitantes (INE 2009), Barcelona es la segunda ciudad española más poblada y la décima de la Unión Europea. El Área Metropolitana de Barcelona, integrada por 36 municipios, tiene una población de 3.218.071 habitantes y una superficie de 636 km². El Área metropolitana de Barcelona es la delimitación como núcleo urbano definida oficialmente, sin embargo ésta estaría incluida en la Región urbana de Barcelona, que se extendería por todo el área de influencia de la ciudad, con 4.992.193 (INE 2009) habitantes con una densidad de población de 1.542 habitantes/km².

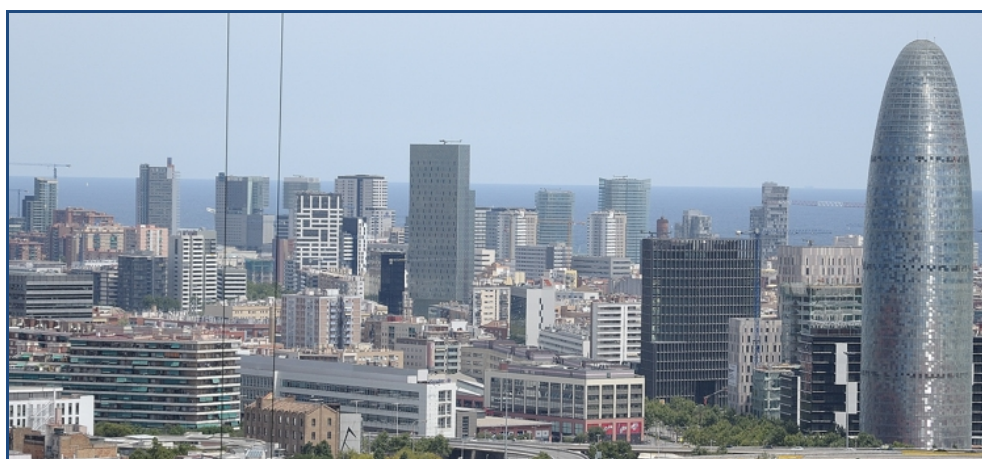


Figura 4- 8: Vista panorámica de la ciudad de Barcelona.

Población total	1.800.000 habitantes
Superficie (STT)	120 km²
Factor de penetración (FP)	0,75

Tabla 4- 3: Datos de la ciudad de Barcelona para el cálculo del número de celdas necesarias.

4.3.1.1. Planificación de WiMAX *indoor*.

4.3.1.1.1. Resultados para requisito del usuario de descarga de 50 Mbyte y 100 Mbyte diaria.

Siguiendo las formulas (1) y (2) expuestas en el epígrafe 4.1.1 de este capítulo se obtienen el número de celdas necesarias para dar cobertura a la ciudad de Barcelona de acuerdo con la superficie de la zona. Este valor está representado con el color azul en la Figura 4-9. A su vez, en la misma figura se expone en color rojo la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para un una tasa de descarga diaria de 50 MBytes por usuario y se expone en color verde la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para una tasa de descarga diaria de 100 MBytes por usuario, valores obtenidos a través de las fórmulas del epígrafe 4.1.2.

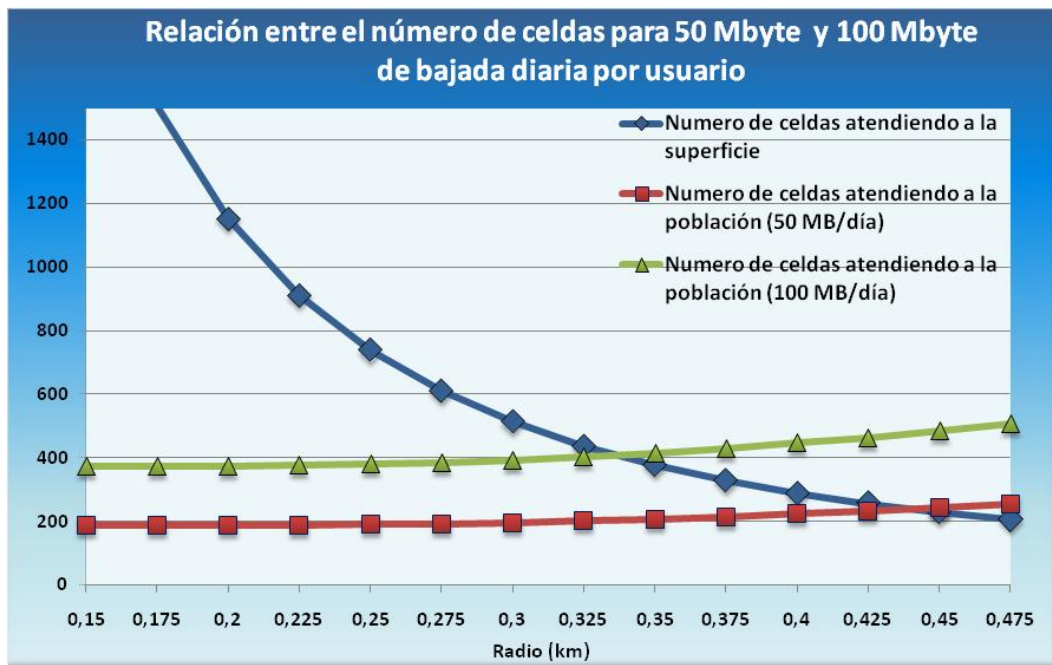


Figura 4- 9: Relación entre el número de celdas por superficie y el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Barcelona.

De la figura anterior podemos concluir que para un requisito de 50 MBytes el valor de la relación entre el número de celdas por superficie y la cantidad de celdas por población con un tráfico de pico a promedio de 2 se corresponde con 437 celdas aproximadamente para un radio de 325 metros mientras que para un requisito de 100 Mbyte se corresponde con 738 celdas aproximadamente para un radio de 250 metros.

Para la ciudad de Barcelona, el radio de la celda con una bajada diaria de 50 MB por usuario será 350 metros y para 100 MB por usuario será 350 metros para un tráfico de pico a promedio de 1 (prácticamente imposible).

4.3.2.1. Planificación de WiMAX móvil.

Siguiendo las formulas (1) y (2) expuestas en el epígrafe 4.1.1 de este capítulo se obtienen el número de celdas necesarias para dar cobertura a la ciudad de Barcelona con un factor de penetración del 5% de acuerdo con la superficie de la zona, dibujado en azul en la siguiente figura. Del mismo modo, se expone en color rojo la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para una tasa de descarga diaria de 50 MBytes por usuario y en color verde la cantidad de celdas necesaria para una tasa de descarga diaria de 100 MBytes por usuario.

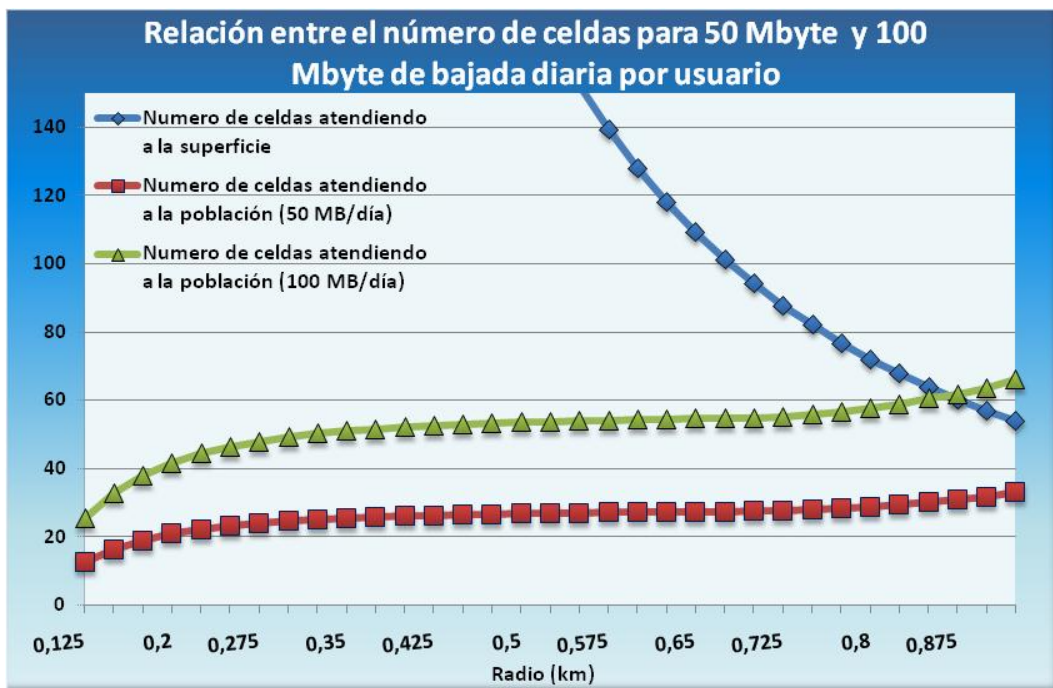


Figura 4- 10: Relación entre el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario móvil para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Barcelona.

Analizando la Figura 4-10 podemos concluir que el número de celdas será 109 celdas para un radio de 650 metros, consiguiendo un valor de tráfico de pico a promedio de 2 para un requisito de 100 MBytes de descarga diaria.

Para la ciudad de Barcelona y la aplicación WiMAX para usuarios móviles, el radio de la celda con una bajada diaria de 100 MB por usuario será 850 metros para un tráfico de pico a promedio de 1 (prácticamente imposible).

4.3.2. Municipio de Mosul.

Mosul es una ciudad localizada en el norte de Iraq. Ubicada al este del río Tigris y distante aproximadamente unos 330 km de Bagdad. En 1987 tenía 664.221 habitantes, pasando aproximadamente a 1.300.000 habitantes en 2008. Es la tercera ciudad más grande de Iraq después de Bagdad y Basora.



Figura 4- 11: Ciudad de Mosul atravesada por el río Tigris.

Población total	1.300.000 habitantes
Superficie (STT)	300 km²
Factor de penetración (FP)	0,6

Tabla 4- 4: Datos de la ciudad de Mosul para el cálculo del número de celdas necesarias.

4.3.2.1. Planificación de WiMAX *indoor*.

4.3.2.1.1. Resultados para requisito del usuario de descarga de 50 Mbyte y 100 Mbyte diaria.

Siguiendo las fórmulas (1) y (2) expuestas en el epígrafe 4.1.1 de este capítulo se obtienen el número de celdas necesarias para dar cobertura a la ciudad de Mosul de acuerdo con la superficie de la zona. Este valor está representado con el color azul en la Figura 4-12. A su vez, en la misma figura se expone en color rojo la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para una tasa de descarga diaria de 50 MBytes por usuario y en color verde la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para un una tasa de descarga diaria de 100 Mbyte por usuario, valores obtenidos a través de las fórmulas del epígrafe 4.1.2.

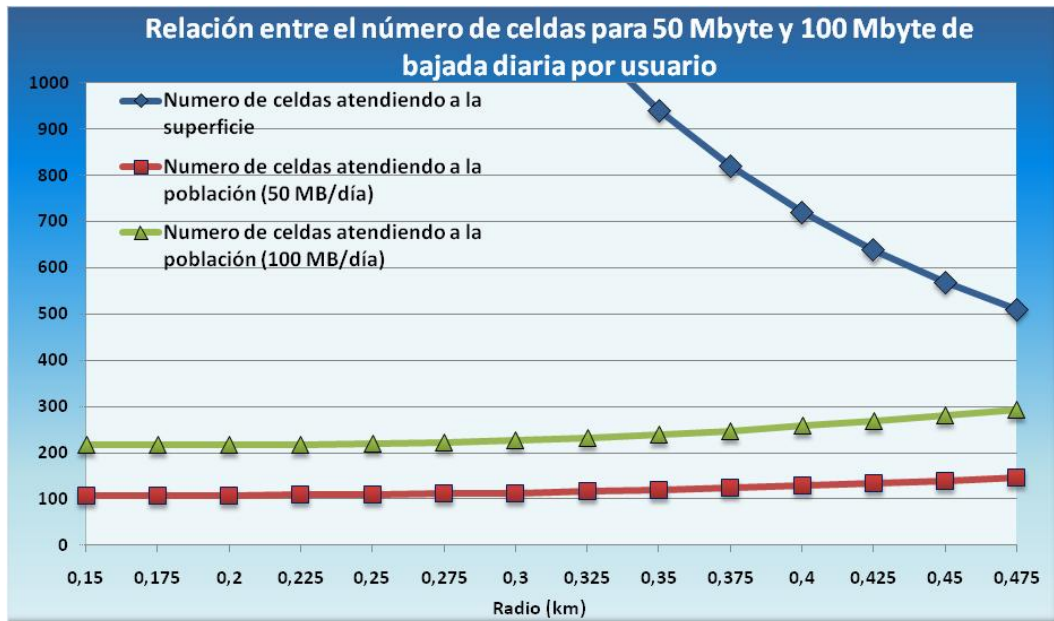


Figura 4- 12: Relación entre el número de celdas por superficie y el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Mosul.

De la figura anterior podemos deducir que para un requisito de 50 MBytes el valor de la relación entre el número de celdas por superficie y la cantidad de celdas por población con un tráfico de pico a promedio de 4 se corresponde con 570 celdas aproximadamente para un radio de 450 metros mientras que para un requisito de 100 Mbyte se corresponde con 570 celdas aproximadamente para un radio de 450 metros con un tráfico de pico a promedio de 2.

4.3.2.2. Planificación de WiMAX móvil.

Siguiendo las formulas (1) y (2) expuestas en el epígrafe 4.1.1 de este capítulo se obtienen el número de celdas necesarias para dar cobertura a la ciudad de Mosul con un factor de penetración del 5% de acuerdo con la superficie de la zona, dibujado en azul en la siguiente figura. A su vez, se expone en color rojo la cantidad de celdas necesaria atendiendo al requisito de la población para una tasa de descarga diaria de 50 MBytes por usuario y en color verde la cantidad de celdas necesaria para una tasa de descarga diaria de 100 MBytes por usuario.

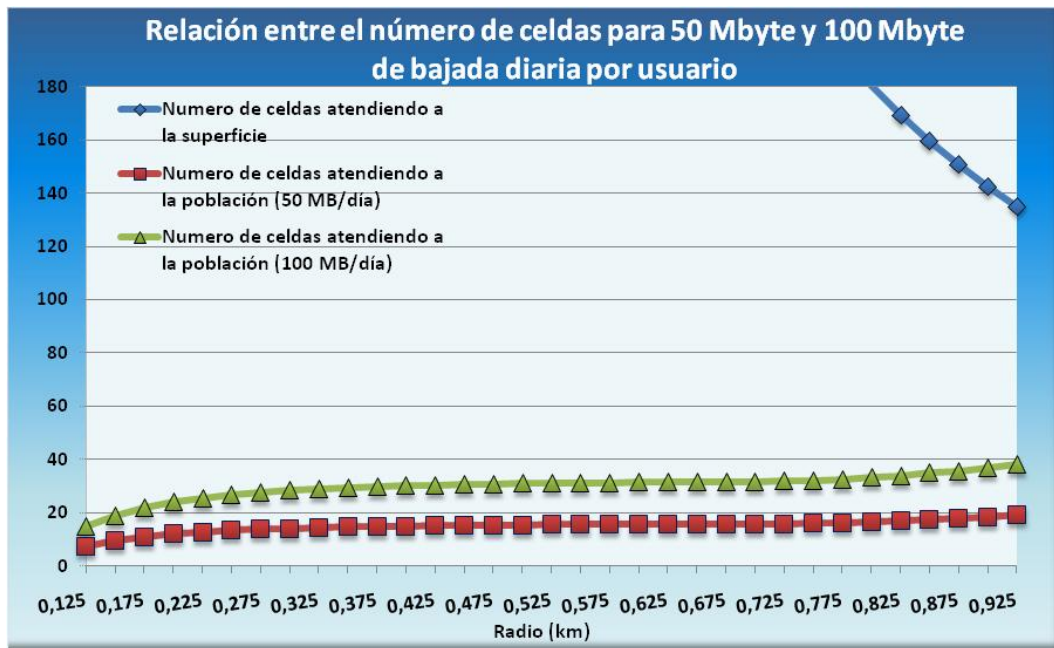


Figura 4- 13: Relación entre el número de celdas por superficie y el número de celdas para 50 Mbyte y para 100 Mbyte de bajada diaria por usuario móvil para distintos valores de radio de celda en la ciudad de Mosul.

Observando la Figura 4-13 podemos afirmar que el número de celdas será 135 celdas para un radio de 925 metros, consiguiendo un valor de tráfico de pico a promedio de 3,5 para un requisito de 100 MBytes de descarga diaria.

4.4. Sumario de las aplicaciones WiMAX indoor.

Con el fin de establecer una comparativa equivalente entre las cuatro ciudades de nuestro estudio, para el requisito de descarga de 50 Mbyte diaria por usuario se ha utilizado un tráfico de pico a promedio de 5 mientras que para 100 Mbyte el tráfico de pico a promedio es de 2.

Ciudad	Anchura de banda/sector	50 Mbyte diario/usuario		100 Mbyte diario/usuario	
		Número total de celdas	Radio de celda (m)	Número total de celdas	Radio de celda (m)
Madrid	1.25 MHz	1.902	350	1.657	375
Bagdad	1.25 MHz	2.673	325	2.305	350
Barcelona	1.25 MHz	912	225	738	250
Mosul	1.25 MHz	639	425	570	450

Tabla 4- 5: Sumario de los resultados obtenidos para la aplicación WiMAX *indoor* en las ciudades elegidas.

Si aumenta bien el número de habitantes, o bien se incrementa del factor de penetración ó incluso se necesita un requisito de descarga diaria mayor, siempre se puede aumentar la anchura de banda hasta llegar a un valor de 10 MHz por sector para proporcionar cobertura a los usuarios de WiMAX.

4.5. Sumario de las aplicaciones WiMAX móvil.

Con el fin de establecer una comparativa equivalente entre las cuatro ciudades de nuestro estudio, para el requisito de descarga de 50 Mbyte diaria por usuario se ha utilizado un tráfico de pico a promedio de 4 mientras que para 100 Mbyte el tráfico de pico a promedio es de 2, mismos valores que para la aplicación WiMAX indoor del apartado 4.4. En la ciudad de Mosul, se han escogido los menores valores posibles de tráfico de pico a promedio que son 7 y 3,5 para las tasas de descarga de 50 MB y 100 MB diaria respectivamente.

Ciudad	Anchura de banda/sector	50 Mbyte diario/usuario		100 Mbyte diario/usuario	
		Número total de celdas	Radio de celda (m)	Número total de celdas	Radio de celda (m)
Madrid	1.25 MHz	304	875	304	875
Bagdad	1.25 MHz	369	875	369	875
Barcelona	1.25 MHz	109	650	109	650
Mosul	1.25 MHz	135	925	135	925

Tabla 4- 6: Sumario de los resultados obtenidos para la aplicación WiMAX móvil en las ciudades.

Sabiendo que el factor de penetración de la aplicación de WiMAX móvil en la población de cada ciudad es un 5%, los resultados obtenidos son concordantes en comparación con los obtenidos para WiMAX indoor ya que para WiMAX móvil es necesaria una menor cantidad de celdas para dar cobertura a la misma ciudad.

4.6. Comparación de las aplicaciones WiMAX portátil (indoor) y WiMAX fijo (outdoor).

Podemos comparar nuestros resultados del apartado 4.4 para aplicaciones de WiMAX 802.16e en un escenario indoor con los obtenidos en un trabajo fin de máster para las aplicaciones de WiMAX fijo (IEEE 802.16d)⁴⁵ para un escenario *outdoor* en las ciudades de Madrid, Bagdad y Mosul que se exhiben en la Tabla 4-7.

Ciudad	Radio de la celda (km)	Número total de celdas	Anchura de banda por sector
Madrid	1,75	76	10 MHz
Bagdad	1,6	112	10 MHz
Mosul	2,2	24	10 MHz

Tabla 4- 7: Resultados para la aplicación WiMAX fijo outdoor en varias ciudades.

Debemos mencionar que los resultados mostrados se corresponden con un requisito de 50 MBytes de descarga diaria y para un valor de tráfico de pico a promedio de 1,3.

Como podemos comprobar, el ancho de banda por sector es menor en nuestro caso 1,25 MHz frente a los 10 MHz utilizados con WiMAX 802.16d. Para nuestra aplicación de WiMAX móvil podemos entender el ancho de banda por sector como un factor de seguridad ya que antes de incrementar el número de celdas siempre podemos aumentar el valor de ancho de banda hasta 10 MHz, a partir del cual nos veremos obligados a extender el número de celdas.

También varía el parámetro de tráfico de pico a promedio ya que para nuestra aplicación tenemos que usar un valor de 5 mientras que para WiMAX outdoor es suficiente con un valor de 1,3. Por último, la variable que sufre un significativo cambio es el radio de la celda; como era de esperar, en la aplicación de exteriores (*outdoor*) el radio es mayor que para nuestra aplicación de interiores (*indoor*).

⁴⁵ Fuente: Enrique Carreras Paz, Trabajo fin de máster: "Sistemas WiMAX multiceldas". Escuela Politécnica Superior, UAM. Septiembre 2009

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro.

5.1. Conclusiones.

Una vez realizado el estudio en profundidad del sistema IEEE 802.16e ó WiMAX Mobile, estamos en condiciones de sacar conclusiones globales acerca de la tecnología y su funcionamiento, siendo una alternativa muy competitiva para el acceso de banda ancha.

Antes de implementar cualquier tecnología es importante realizar estudios de viabilidad de la misma, éste ha sido el principal objetivo de este proyecto, simular el comportamiento de WiMAX móvil basado en los parámetros más importantes que componen los dispositivos involucrados en un sistema WiMAX multiceldas.

Las conclusiones obtenidas se refieren a los tres objetivos principales de este proyecto fin de carrera, definidos en el capítulo 1:

- ❖ Análisis y obtención del radio máximo de trabajo de celda en cada escenario dependiendo de los parámetros variables en las simulaciones.
- ❖ Cálculo de la tasa binaria neta de descarga promediada en un conjunto de valores de alturas de la estación suscriptor.
- ❖ Planificación de sistemas WiMAX para usuarios portátiles (*indoor*) y móviles en varias ciudades hallando una estimación del número de celdas para cada aplicación.

Respecto al **análisis de cobertura** realizado se puede concluir:

Analizando los resultados podemos decir que el radio máximo de la celda será menor cuanto mayor valor de SINR, es decir, aquellos usuarios “deluxe” que gocen de la máxima tasa binaria de descarga tendrán que estar muy cerca de la estación base mientras que los usuarios “no privilegiados” con tasas binarias bajas podrán situarse más lejos de la estación base. A modo de ejemplo, para una anchura de haz de la estación base de 120° y una altura de 40 metros en un escenario urbano, el radio máximo de celda para los usuarios deluxe será 175 metros mientras que los usuarios comunes podrán situarse en un radio máximo de 450 metros.

Como conclusión general, cuanto mayor sea la altura a la que se instalen las antenas transmisoras, más alcance y mayor SINR se obtiene, al tener menos obstáculos en la trayectoria del enlace radio. También se prefiere una mayor anchura de haz para obtener los mejores resultados. Se ha determinado, a la vista de los resultados expuestos, que es preferible utilizar las antenas de la estación base con una altura de 40 m y una anchura de haz de 120 grados para que el efecto de las interferencias sea menor y así poder ofrecer una mayor cobertura.

En relación a la altura de la estación suscriptor, se comprueba que se obtienen mejores resultados a mayor altura. A modo de ejemplo numérico, en el mismo escenario mencionado el máximo radio para una antena receptora de 1 metro, 4 metros, 7 metros y 10 metros son 450 metros, 600 metros, 700 metros y 750 metros, respectivamente.

Los resultados de la SINR varían dependiendo del terreno para el cual se instale un sistema WiMAX. Comparando los resultados en zonas urbanas, suburbanas y rurales podemos asegurar que el mayor radio de celda se corresponde con las áreas rurales para el mínimo valor de SINR que proporciona la menor modulación posible. Por el contrario, para los usuarios “deluxe” con la mayor modulación posible los mejores resultados son los obtenidos en zonas urbanas.

En las simulaciones para usuarios móviles de WiMAX se han obtenido mayores radios de celda ya que las pérdidas de propagación son menores que para el caso de los usuarios de WiMAX portátil (*indoor*). También, como era de esperar, se han obtenido mejores resultados para la simulación de WiMAX *indoor* con la señal atravesando la ventana ya que las pérdidas por penetración a través de las fachadas son mayores que a través de la ventana.

Por último, en cuanto a análisis de cobertura se refiere, la SINR dependerá entre otros factores de la potencia de salida del transmisor. Cuanto mayor sea la potencia máxima permitida, mayor relación señal-ruido se obtiene, logrando así poder dar cobertura con la mayor modulación posible.

En relación al **estudio de la capacidad del sistema WiMAX** se puede resumir:

Para una celda trisectorial en la que cada sector cuenta con un ancho de banda de canal de 10 MHz en un escenario de WiMAX *indoor* para usuarios portátiles, la tasa binaria neta (real) promedio de las cuatro posibles alturas de estación suscriptor (1, 4, 7 y 10 metros) se corresponde con 26,73 Mbps por sector y su valor irá disminuyendo conforme aumente la distancia entre la estación base y el receptor (radio de la celda). La tasa binaria bruta es mayor, exactamente tiene un valor de 45 Mbps por sector. Sin embargo este valor se reduce debido a la relación entre el tiempo de transmisión dedicado al downlink respecto al total (uplink junto con downlink), el tiempo útil de transmisión sobre el total de tiempo de transmisión más tiempo de guarda y la eficiencia en ancho de banda.

La bajada de la tasa binaria indica la introducción de nuevos usuarios en la celda con una modulación inferior hasta alcanzar el radio límite de trabajo (radio máximo de la celda) a partir del cual los usuarios no pueden tener servicio WiMAX.

La tasa binaria de descarga promedio en un edificio viene limitada por el máximo radio posible de celda para dar servicio WiMAX a la menor altura de estación suscriptor, exactamente se corresponde con una altura de un metro, en los distintos tipos de escenarios. Sin embargo, para las diferentes alturas se ha obtenido los resultados de tal manera que se encontrase el máximo radio posible en cada simulación. La principal razón se debe a que el proveedor de conectividad inalámbrica puede proporcionar servicio WiMAX a usuarios a una determinada altura sin estar obligado a proveer conectividad a los usuarios a más baja altura.

Finalmente, acerca de **la planificación de sistemas WiMAX Mobile en escenarios reales urbanos** se puede argumentar lo siguiente:

A la hora de calcular el número de celdas, hallamos la cantidad de celdas para un determinado valor del tráfico de pico a promedio que es la relación entre la cantidad de celdas necesaria

atendiendo a la superficie de la ciudad y el número de celdas necesario atendiendo a la población. Dependiendo del requisito de la tasa de descarga diaria y de cada ciudad en particular, se han obtenido los resultados para valores de tráfico de pico a promedio diferentes.

Cabe destacar que para todas las ciudades se ha utilizado una anchura de banda de 1,25 MHz tanto en la aplicación WiMAX indoor como para WiMAX móvil. El número de celdas necesario para WiMAX móvil es menor ya que el factor de penetración, es decir, usuarios móviles de WiMAX respecto el total de la población de cada ciudad, es sólo un 5%. Con el paso de los años se puede aumentar la anchura de banda hasta llegar a 10 MHz por sector; a partir de ese valor, habrá que aumentar el número de celdas necesarias.

La cantidad de celdas depende de la densidad de población, tanto de la superficie como del número de habitantes. Así podemos observar que para un requisito de 50 MBytes de descarga diaria en una aplicación de WiMAX *indoor* para usuarios portátiles la mayor cantidad de celdas necesarias es para la ciudad de Bagdad mientras que la menor cantidad corresponde a Mosul, con 2.673 y 639 celdas respectivamente.

Las soluciones propuestas para las diferentes ciudades analizadas están basadas en datos reales por lo que pueden ser utilizadas como base para el desarrollo de un despliegue de esta tecnología en cualquiera de ellas.

Por último, destacar que la industria de las tecnologías inalámbricas se encuentra en constante desarrollo y notable evolución, su objetivo fundamental es introducir de la manera más rápida posible el mayor número de servicios de acceso inalámbrico de forma eficiente y a bajo coste. WiMAX es una tecnología estandarizada y su viabilidad hace de ella una tecnología que pueda implementarse en cualquier parte del mundo, principalmente en aquellos países en desarrollo donde la demanda de servicios se ve entorpecida por una pobre infraestructura de cable, siendo un sistema integrado con suficiente capacidad para beneficiar principalmente al usuario final.

5.2. Trabajo futuro.

Una posibilidad de trabajo futuro sobre este proyecto fin de carrera es el estudio de una red de acceso de banda ancha mediante las futuras versiones de WiMAX. En el presente trabajo se ha utilizado el estándar IEEE 802.16e, WiMAX Móvil. Con el paso del tiempo, surgirán nuevos estándares pertenecientes a la familia IEE 802.16 incluyendo mejoras, mencionadas en el apartado 2.4.4 del capítulo 2 del presente proyecto, como la utilización de técnicas de múltiples antenas MIMO, el uso de antenas inteligentes (*smart antennas*), la implementación de sistemas de antenas adaptativas con conformación de haz u otros desarrollos futuros.

Otro posible estudio para una línea de investigación futura es el análisis del efecto de las interferencias del canal de frecuencia adyacente sobre el sistema WiMAX móvil.

REFERENCIAS

- [1] “Can WiMAX Address Your Applications?” WiMAX Forum. October, 2005.
- [2] 802.16-2004. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. Aprobado el 24 de Junio de 2004.
- [3] A .Ghosh and D. Wolter, J. Andrews, C. Runhua, “Broadband Wireless Access with WiMax/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential”, *IEEE Comm. Mag.*, Vol.43, No.2, 2005, pp. 129-36.
- [4] A. Teo, K.H.; Tao, Z.; Zhang, J. "The Mobile Broadband WiMAX Standard", *IEEE Signal Processing Magazine*.2007 ,vol. 24, núm 5, p. 144-148.
- [5] B. Marks, Roger. “Standards from IEEE 802 Unleash the Wireless Internet”. *IEEE Microwave Magazine*.2001, num. 2, p. 46-56.
- [6] D. Gray. “Mobile WiMAX: A Performance and Comparative Summary”. WiMAX Forum, Julio 2006.
- [7] Etemad, K. “Overview Mobile WiMAX Technology & evolution”, *IEEE communications Magazine*. 2008, vol. 46, núm. 10, p. 31-40.
- [8] Fiona Vanier, “World Broadband Statistics: Q3 2009”. Point Topic Ltd. December, 2009.
- [9] Fiona Vanier, “World Broadband Statistics: Q4 2009”. Point Topic Ltd. March, 2010.
- [10] IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access. Carl Eklund, Roger B. Marks, Kenneth L. Stanwood, and Stanley Wang. 2 de junio de 2004.
- [11] Ashour Hamdi, Khairi. “Exact SINR Analysis of Wireless OFDM in the Presence of Carrier Frequency Offset”. *IEEE Transactions on wireless communications*. March 2010, vol. 9, No 3.
- [12] LI, Bo; Qin, Yang; P. Low, Chor; L.GWee, Choon. “A Survey on Mobile WiMAX”. *IEEE Communications Magazine*.2007, vol. 45, núm. 12, p. 70-75.
- [13] Motorola’s White Paper. “Optimizing Your WiMAX Device Investment”. Source: www.motorola.com/wimax.
- [14] Motorola’s White Paper. “WiMAX Base Station Selection”. Source: www.motorola.com/wimax.

-
- [15] Quobis Networks. “WiMAX: la revolución inalámbrica”. Quobis, 2006.
- [16] S. Ahmadi, “An overview of next-generation mobile WiMAX technology”, *IEEE Communications Magazine*. 2009, Vol. 47, No. 6, pp. 84-98.
- [17] V. Erceg, Iospan Wireless Inc. (USA), K.V. S. Hari, Stanford University (USA), M.S. Smith, Nortel Networks (GB), D.S. Baum, Stanford University (USA), K.P. Sheikh, Sprint USA), C. Tappenden, Nortel Networks (CND), J.M. Costa, Nortel Networks (CND), C. Bushue, Sprint (USA), A. Sarajedini, BeamReach Networks, R. Schwartz, BeamReach Networks, D. Branlund, BeamReach Networks, T. Kaitz, BreezeCOM y D. Trinkwon; “Channel Models for Fixed Wireless Applications”; IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group White Paper.
- [18] *WiMAX Forum (2006a)*. “Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation”. 53 pp.
- [19] *WiMAX Forum (2006b)*. “Mobile WiMAX – Part II: A Comparative Analysis”. Doug Gray. 47 pp.
- [20] *WiMAX Forum*, “Mobile WiMAX: The Best Personal Broadband Experience!” White Paper. June, 2006.
- [21] *WiMAX Forum*, “WiMAX Applications for Utilities”, White paper. October, 2008.
- [22] *WiMAX Forum*, “WiMAX Forum WiMAX Technology Forecast (2007-2012)”. 2008.
- [23] Yankee Group. “2009 Global WiMAX Forecast: Poised for Portable Broadband Success”. September, 2009.

BIBLIOGRAFÍA

- ❑ Ahson, Syed. “WIMAX: Standards and Security”. BocaRaton: CRC Press, 2008.
- ❑ Ahson, Syed.”WIMAX: Applications”.1ª ed. BocaRaton: CRC Press, 2007.
- ❑ Ahson, Syed; ILYAS, Mohammad. “*WiMAX: Technologies, Performances Analysis, and QoS*”. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- ❑ Andrews, Jeffrey; Ghosh, Arunabha; Muhamed, Rias. “Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Access”. New Jersey: Prentice Hall, June 2007.
- ❑ Chen, Kwan-Cheng; Marca, J. Roberto. “Mobile WIMAX”. Chichester, WestSussex: IEEE: Wiley, 2008.
- ❑ D.Katz, Marcos. “WIMAX Evolution”. San Francisco: John Wiley & Sons, 2009.
- ❑ Ergen, Mustafa. “Mobile Broadband including WIMAX and LTE”.1ª ed. New York: Springer, 2009.
- ❑ José María Hernando Rábanos, “*Comunicaciones Móviles*”. Editorial Centro de estudios Ramón Areces, S.A.
- ❑ José María Hernando Rábanos, “Transmisión por radio”. Editorial Centro de estudios Ramón Areces, S.A.
- ❑ Kumar, Amitabh, “Mobile broadcasting with WiMAX principles, technology, and applications”, 2008.
- ❑ Lee, Byeong Gi, “Broadband wireless access and local networks mobile WiMAX and WIFI”, 2008.
- ❑ Pareek, Deepak. “The Business of WiMAX”. John Wiley & Sons, Ltd. 2006
- ❑ Xiao, Yang. “WIMAX/MobileFi Advanced research and technology”. New York: Auerbach, 2008.
- ❑ Zakhia Abichar, Yanling Peng, and J.Morris Chang. “WiMAX: The Emergence of Wireless Broadband”. IT Pro July, August 2006.
- ❑ Zhang, Yan. “WIMAX network planning and optimization”.1ª ed. BocaRaton: CRC Press, 2009.

GLOSARIO

3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
AAS	Advanced Antenna Systems
AMC	Adaptative Modulation and Coding
ARQ	Automatic Repeat Request
BPSK	Binary phase-shift keying
BS	Base Station
BWA	Broadband Wireless Access
CDMA	Code Division Multiple Access
CPE	Customer Premises Equipment
DL	Downlink
DSL	Digital Subscriber Line
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EV-DO	Evolution-Data Optimized
FBW	Fixed Broadband Wireless
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HDTV	High Definition TV
HSPA	High Speed Packet Access
ICI	Inter Carrier Interference

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT	International Mobile Telecommunications
IP	Internet Protocol
ISI	Inter Symbol Interference
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Layer
MBB	Mobile Broad Band
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service
NLOS	Non Line of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PHY	Physical layer
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SAE	Service Architecture Evolution
SINR	Signal Interference Noise Rate
SLA	Service Level Agreement
SNR	Signal Noise Rate
SS	Subscriber Station
TDD	Time Division Duplex

TDMA	Time Division Multiple Access
UL	Uplink
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VDSL	Very high data rate digital subscriber line
VoD	Video on Demand
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WLL	Wireless Local Loop
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network

Anexo A

Extensión del modelo de propagación de Erceg para alturas de antena receptora superiores a 10 metros.

En todos los casos de las simulaciones de WiMAX realizadas en este proyecto fin de carrera la altura máxima de la antena receptora considerada ha sido 10 metros. En situaciones reales este hecho no se cumple siempre ya que puede que el usuario se encuentre a una altura superior a 10 metros por lo que, en consecuencia, la altura de la antena de recepción superará el límite establecido mencionado. En este anexo se pretende dar una solución aproximada para alturas de antena receptora superiores. Para ello, se simulará un escenario con una antena de la estación base de 30 metros de altura y anchura de haz de 120° con la señal y las interferencias atravesando la fachada del edificio en una zona urbana como se muestra en la siguiente ilustración.

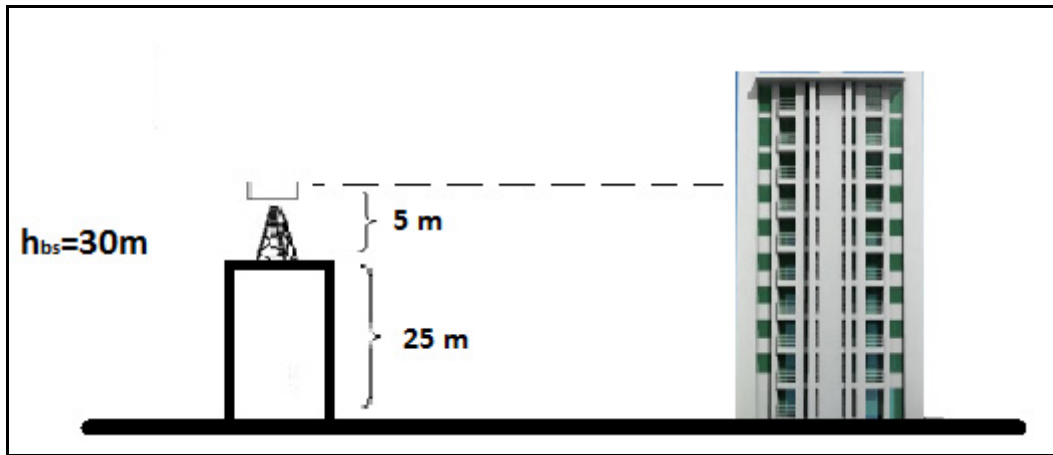


Figura A- 1: Escenario de simulación para la extensión del modelo de propagación para alturas de antena receptora superiores a 10 metros.

El modelo detallado para la obtención de los resultados se describe a continuación en función de la altura de la antena receptora:

- 1 a 10 metros: se utilizan los resultados obtenidos en el capítulo 3, concretamente los mostrados en el epígrafe 3.1 que calculan las pérdidas de propagación a través del **modelo de Erceg**, explicado detalladamente en el apartado 3.1.a.
- Superior o igual a 30 metros: cuando la altura de la antena receptora es igual o superior a la altura de la antena transmisora podemos considerar que las pérdidas se deben al **espacio libre** (*free space*). Dichas pérdidas P_{fs} se pueden calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$P_{fs} = 92.45 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) \quad (\text{A.1})$$

Dónde d es la distancia entre la antena transmisora y receptora expresada en km y f es la frecuencia de trabajo en GHz.

A una altura de antena receptora de 30 metros se aplica el modelo de espacio libre. Debemos mencionar que para la señal deseada es correcto pero para las interferencias estamos cometiendo un pequeño error ya que a esa altura exacta no podemos asegurar que todas las señales interferentes estén en línea de visibilidad directa. Sin embargo, es una aproximación muy exacta ya que hablamos de un error únicamente cometido para un único valor de altura.

- Rango comprendido entre 10 y 30 metros: se realizará una interpolación lineal tomando como puntos de referencia los valores de pérdidas a alturas 10 y 30 metros.

En la siguiente representación se muestra de forma más visual el modelo seguido para el cálculo de las pérdidas de propagación en función de la altura de la antena receptora.

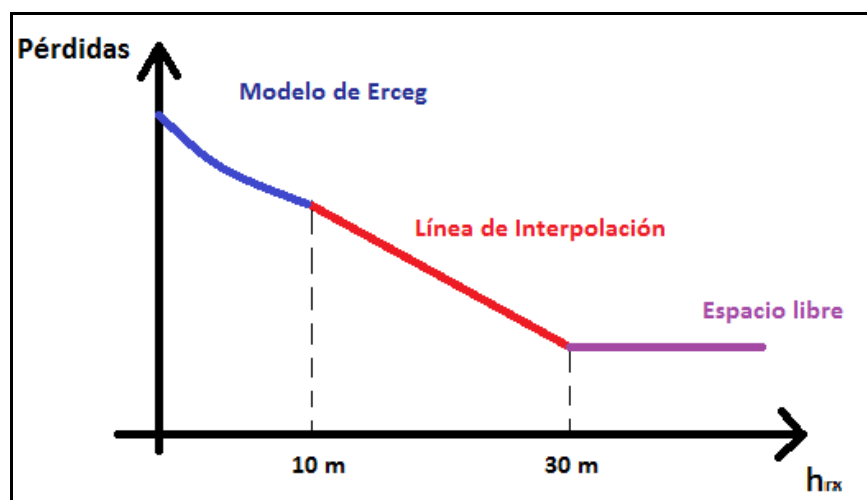


Figura A- 2: Modelo para el cálculo de las pérdidas de propagación en función de la altura de la antena receptora.

Otro valor de pérdidas que debemos tener en cuenta es el debido al desvanecimiento por sombra (shadowing). En el rango de valores de 1 a 10 metros de la altura, el valor es constante a 10 dB, para la zona de pérdidas por espacio libre el valor es nulo por lo que en los valores de altura comprendida entre 10 y 30 metros, el desvanecimiento S seguirá la siguiente fórmula:

$$X_{\text{shad}} \text{ (dB)} = 10 - 10 \cdot [(h_{\text{rx}} \text{ (m)}) - 10] / 20] \quad 10 \text{ m} \leq h_{\text{rx}} \leq 30 \text{ m} \quad (\text{A.2})$$

Que se ha obtenido sustituyendo el valor X por 10 metros de la fórmula más general:

$$X_{\text{shad}} \text{ (dB)} = X - X \cdot [(h_{\text{rx}} \text{ (m)}) - 10] / (h_{\text{tx}} \text{ (m)} - 10)] \quad (\text{A.3})$$

Para entender la extensión del modelo de propagación debemos mencionar como cambia el exponente de las pérdidas de propagación para las distintas alturas de estación base y estación suscriptor. En la Tabla A-1 se muestra el valor del exponente de propagación, γ , para el modelo de pérdidas de Erceg, que sigue la ecuación 3.3 del capítulo 3.a) en función de la altura de la estación base y para las tres zonas aplicables en el modelo. En concreto para este anexo nos interesa el valor sombreado en azul, 4.795, que corresponde a una zona urbana para una altura de transmisor de 30 metros y una altura de receptor de 1 a 10 metros.

	Altura de la estación base 30 metros	Altura de la estación base 40 metros
Zona Urbana (Zona 1 del modelo de Erceg)	4.7950	4.6150
Zona Suburbana (Zona 2 del modelo de Erceg)	4.3750	4.1675
Zona Rural (Zona 3 del modelo de Erceg)	4.1167	3,9000

Tabla A- 1: Valores del exponente de propagación para el modelo de Erceg.

A una altura de 30 metros el exponente de propagación decrece hasta un valor de 2 para el modelo de pérdidas por espacio libre como podemos comprobar analizando la formula A.1.

La relación señal a interferencia, SIR, se puede definir siguiendo la fórmula:

$$\text{SIR (dB)} = 10 \cdot \log_{10} \cdot K \cdot (r/d_i)^n \quad (\text{A.4})$$

Dónde K es una constante, r es la distancia del transmisor al receptor, d_i es la distancia de la antenna interferente al receptor y n es el exponente de propagación.

Como puede deducirse, en el modelo de espacio libre el valor de SIR baja ya que el exponente de propagación es menor. Sin embargo se produce una subida de SNR ya que la potencia del ruido se mantiene constante pero la potencia de señal aumenta. Como resultado global obtenemos un decremento del valor de SINR, relación de señal deseada frente a interferencias más ruido, debido a que se trata de un sistema limitado por las interferencias y si el valor de SIR baja, el valor de SINR también bajará ya que la subida de SNR no es suficiente para compensar el descenso de la SIR.

A.1. Valores de tasa binaria de descarga para diferentes alturas de antenas receptoras.

A.1.1 Altura de la antena receptora de 10 metros.

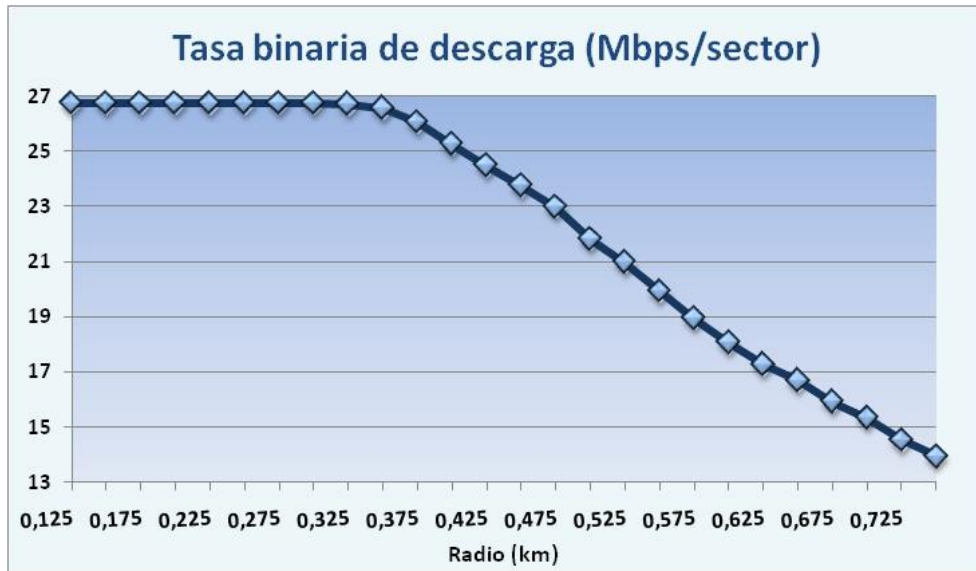


Figura A- 3: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 10 metros en una zona urbana.

A.1.2 Altura de la antena receptora de 13 metros.

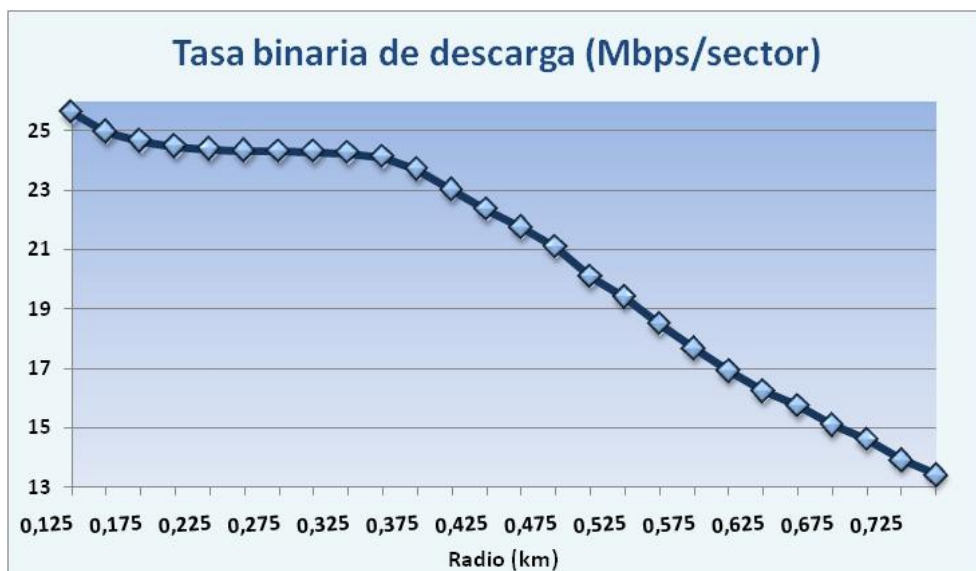


Figura A- 4: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 13 metros en una zona urbana.

A.1.3 Altura de la antena receptora de 16 metros.

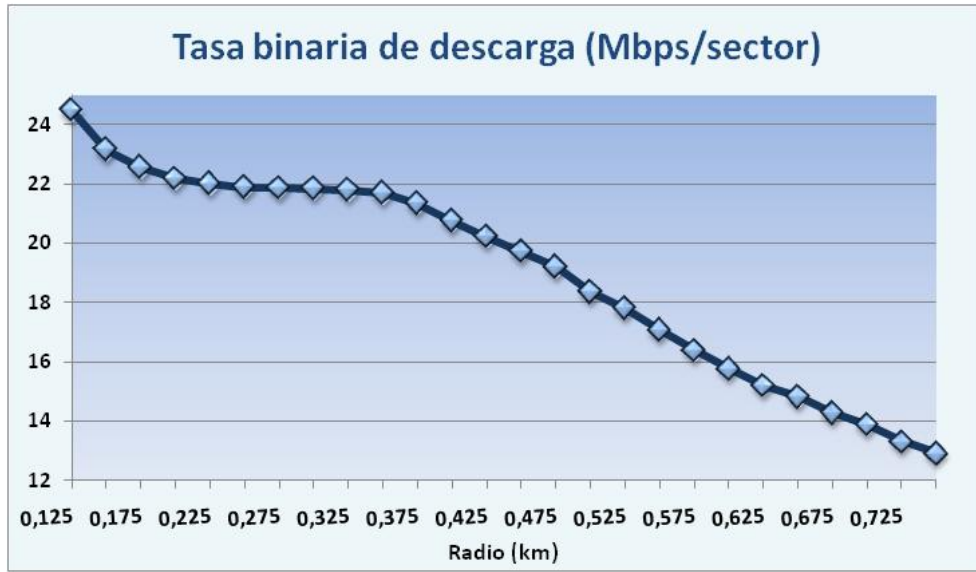


Figura A- 5: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 16 metros en una zona urbana.

A.1.4 Altura de la antena receptora de 19 metros.

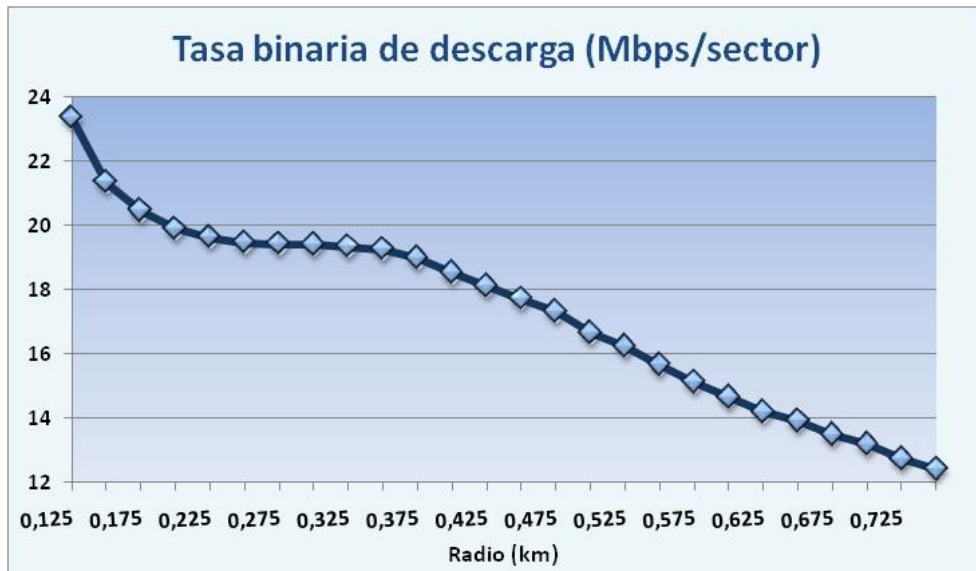


Figura A- 6: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 19 metros en una zona urbana.

A.1.5 Altura de la antena receptora de 22 metros.

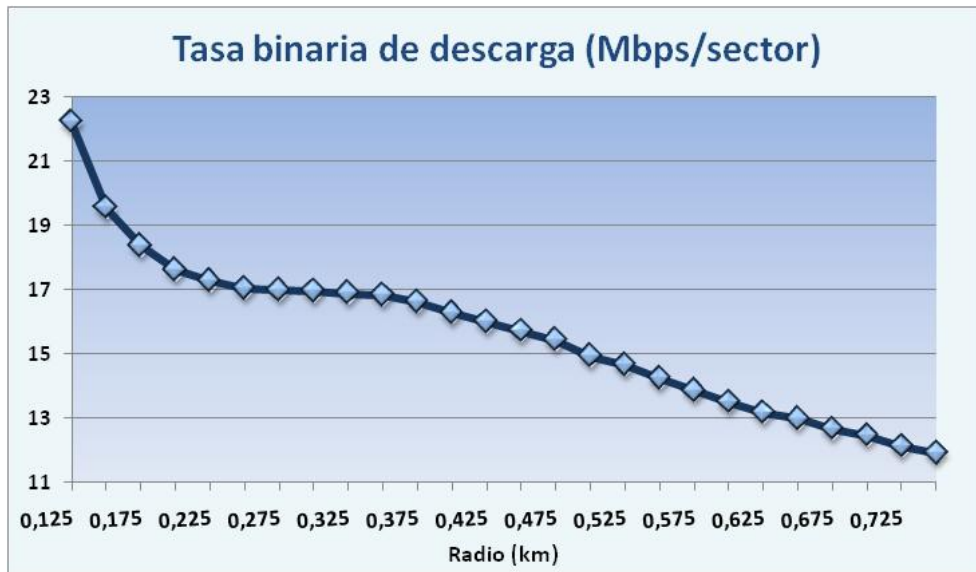


Figura A- 7: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 22 metros en una zona urbana.

A.1.6 Altura de la antena receptora de 25 metros.



Figura A- 8: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 25 metros en una zona urbana.

A.1.7 Altura de la antena receptora de 28 metros.

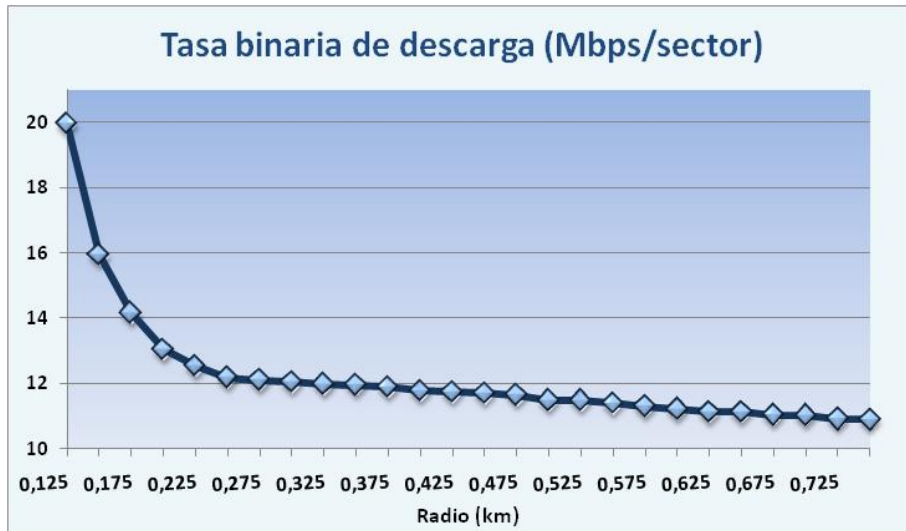


Figura A- 9: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 28 metros en una zona urbana.

A.1.8 Altura de la antena receptora de 31 metros.

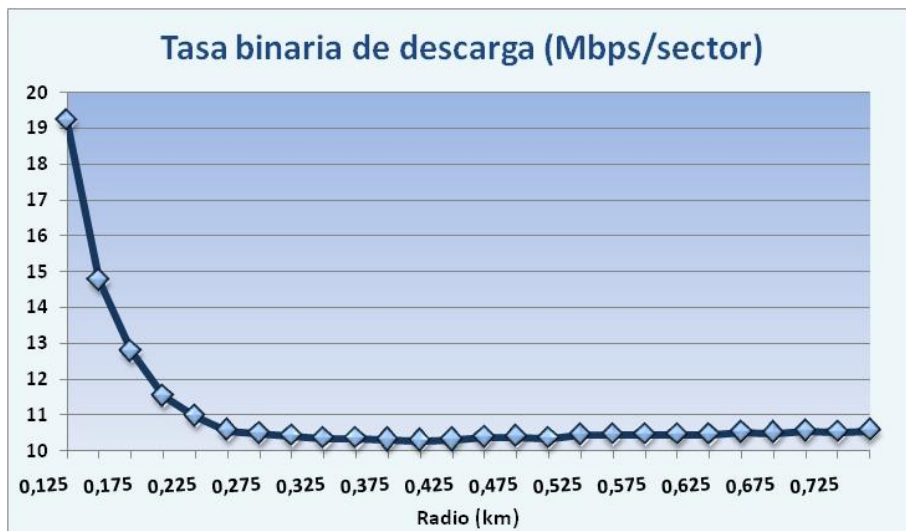
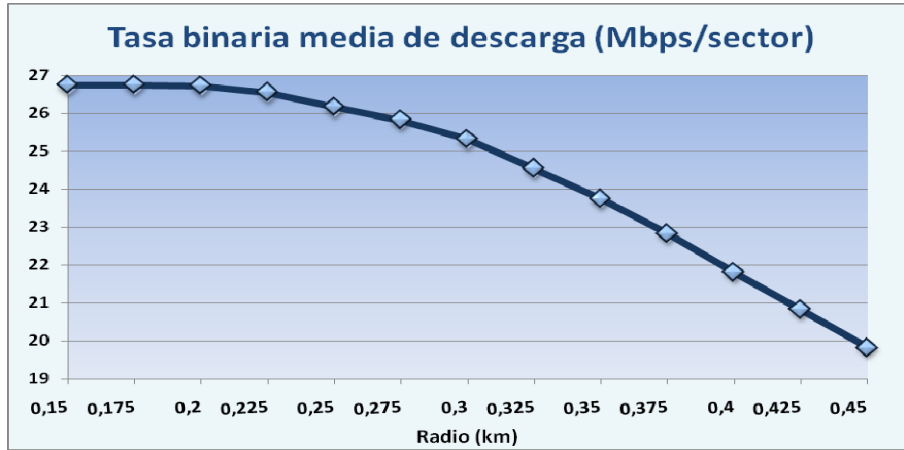


Figura A- 10: Tasa binaria de descarga para una altura de antena de receptora de 31 metros en una zona urbana.

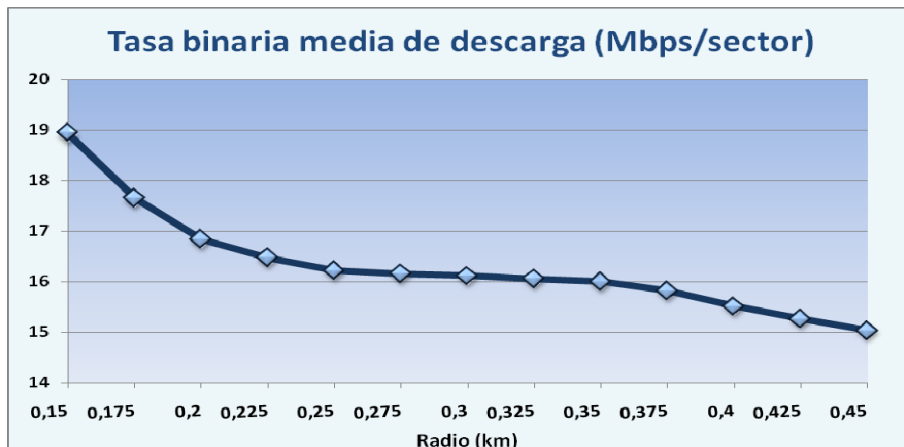
Nota: Para las sucesivas alturas, 34, 37 y 40 metros, se obtienen los mismos resultados de tasa binaria de descarga que para la altura de 31 metros por lo que las gráficas se han omitido.

A.2. Comparativa de valores medios de tasa binaria de descarga.

A.2.1 Tasa binaria media para alturas entre 1 y 10 metros.



A.2.2 Tasa binaria media para alturas entre 10 y 40 metros.



A.2.3 Tasa binaria media para alturas entre 1 y 40 metros.

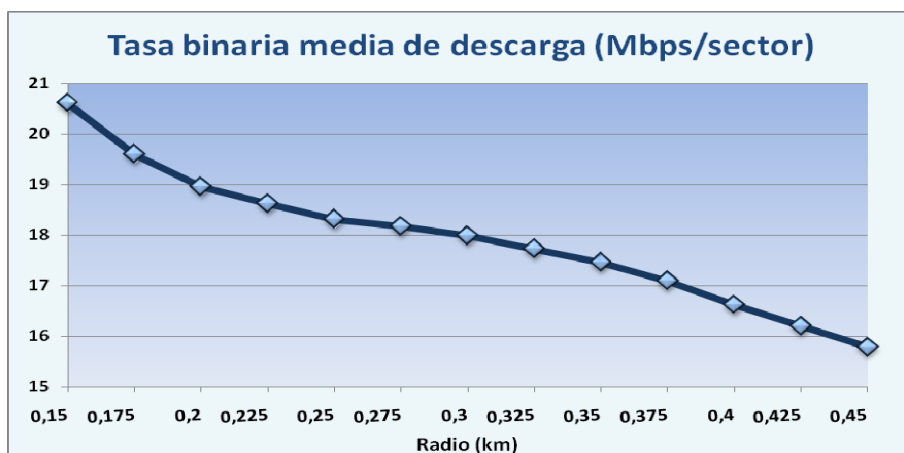


Figura A- 11: Comparativa de la tasa binaria media dependiendo de los valores de altura de antena receptora considerados.

A.3. Gráficas de SINR.

Se representan para todas las alturas la gráfica de SINR cuyo valor mínimo es 6,4 dB exhibiendo el máximo radio posible de la celda.

A.3.1 Altura de la antena receptora de 13 metros.

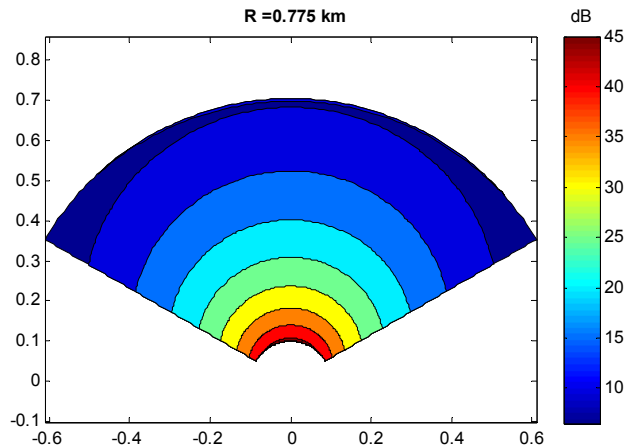


Figura A- 12: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 13 metros en una zona urbana.

A.3.2 Altura de la antena receptora de 16 metros.

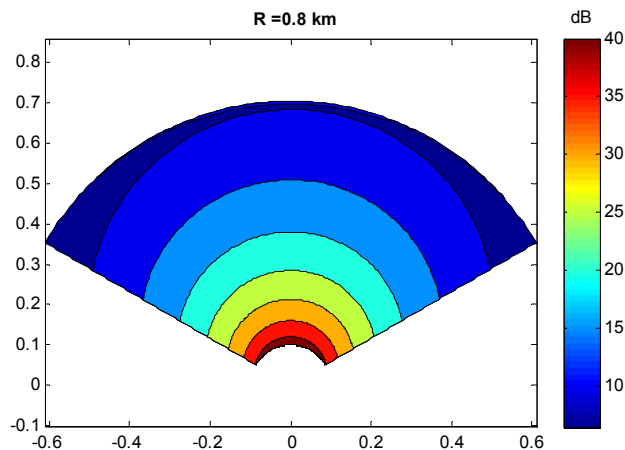


Figura A- 13: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 16 metros en una zona urbana.

A.3.3 Altura de la antena receptora de 19 metros.

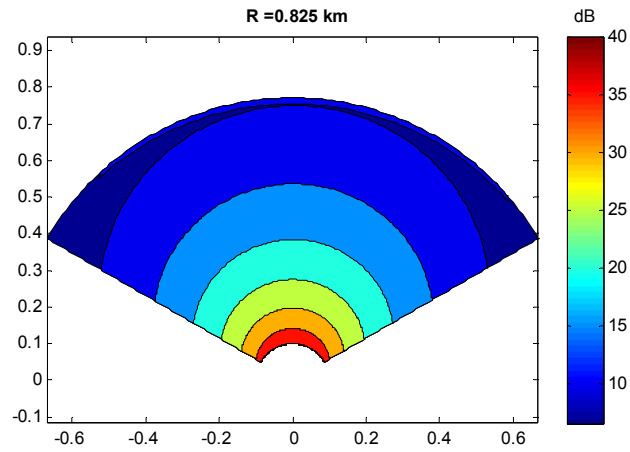


Figura A- 14: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 19 metros en una zona urbana.

A.3.4 Altura de la antena receptora de 22 metros.

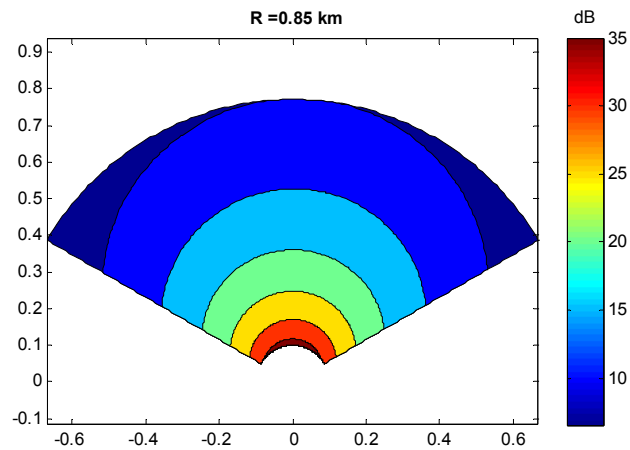


Figura A- 15: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 22 metros en una zona urbana.

A.3.5 Altura de la antena receptora de 25 metros.

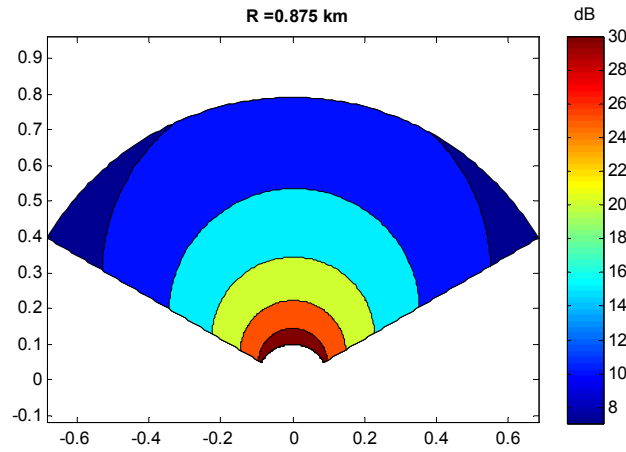


Figura A- 16: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 25 metros en una zona urbana.

A.3.6 Altura de la antena receptora de 28 metros.

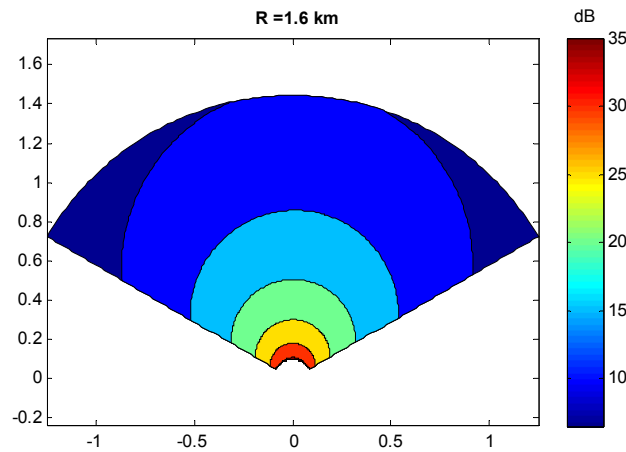


Figura A- 17: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 28 metros en una zona urbana.

A.3.7 Altura de la antena receptora de 31 metros.

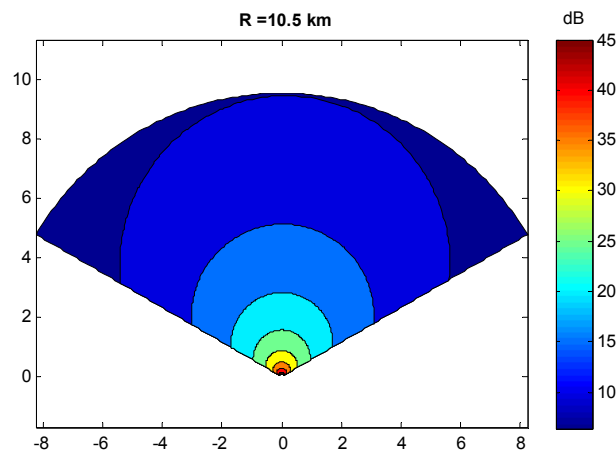


Figura A- 18: Gráfica de SINR para una altura de antena receptora de 31 metros en una zona urbana.

El proveedor u operador de telecomunicaciones que proporciona el servicio WiMAX a sus clientes asegura un radio de trabajo de hasta 10,5 km para alturas de antena suscriptoras superiores a 30 metros.

Como podemos concluir de todos los resultados presentados, el valor de SINR disminuye conforme incrementa la altura de la estación suscriptora. Al alcanzar la altura mínima para poder asumir que nos encontramos en un modelo de espacio libre las pérdidas de propagación casi se estabilizan y crecen con incrementos muy pequeños debido al exponente de propagación. Por este hecho, obtenemos un radio de trabajo de 10 kilómetros en comparación con los 775 metros para altura de receptor de 13 metros.

Respecto a las tasa binaria de descarga, obtenemos los mayores valores promedio para el rango de alturas de antena receptora entre 1 y 10 metros y las menores tasas para alturas entre 10 y 40 metros, teniendo un valor intermedio de tasa binaria para todo el rango de alturas de 1 a 40 metros.

Nota: Para las sucesivas alturas, 34, 37 y 40 metros, se obtienen los mismos resultados de SINR que para la altura de 31 metros por lo que las gráficas se han omitido.

Anexo B

Elementos de la arquitectura WiMAX móvil.

El propósito de este anexo es dar a conocer al lector el tipo de arquitectura WiMAX empleada en el proyecto principalmente proporcionar una descripción de los componentes reales que la forman. Todos los equipos nombrados en este anexo forman parte de la familia de *WiMAX Forum Certified™ Solutions for Fixed and Nomadic Services* certificado por el WiMAX Forum.

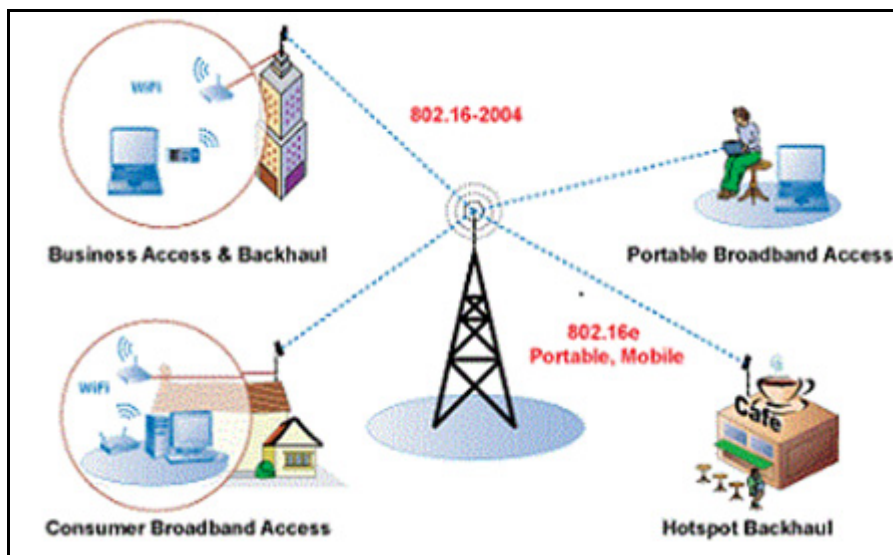
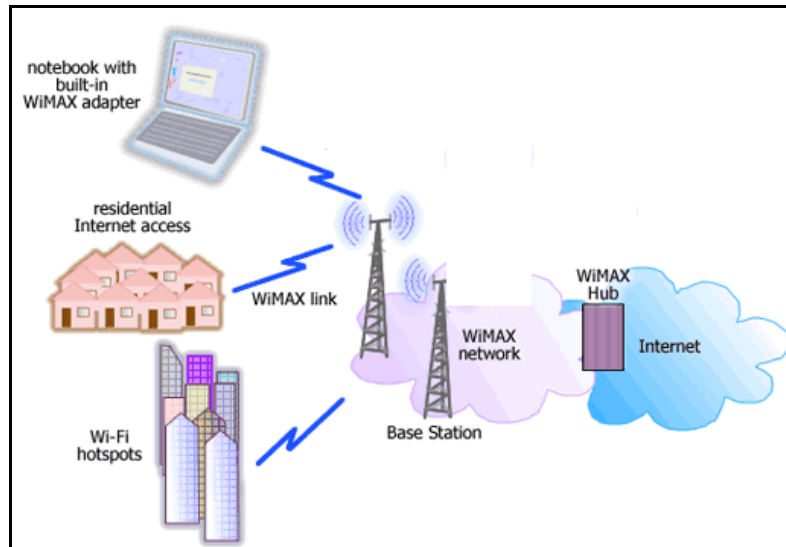


Figura B- 1: Ejemplos de arquitecturas WiMAX Mobile con diferentes tipos de estaciones suscriptoras.

B.1. Descripción de la estación base WiMAX Mobile.

La estación base elegida es el modelo Mobile Base Station (SC-100e) del suministrador RedMAX 4CTM⁴⁶, una de las primeras estaciones de WiMAX Mobile con el distintivo WiMAX Forum Certified. Se trata de una solución inalámbrica de banda ancha capaz de ofrecer alta calidad de voz, vídeo y servicios de datos y aplicaciones. Diseñada para satisfacer las especificaciones WiMAX Forum, la estación RedMAX SC-100e es completamente interoperable con el resto de equipos existentes en el mercado.

Es fácil de instalar y muy rentable para el despliegue. Su baja latencia asegura de que proporcione una excelente calidad a los servicios sensibles al retraso ofrecidos sobre WiMAX, como el tráfico de voz, voz sobre IP (VoIP), vídeo y tráfico de datos. Los nuevos suscriptores pueden ser provistos de servicio dinámicamente provisión, mientras que los clientes existentes pueden modificar sus contratos en el momento, sin afectar a los servicios actuales. Su arquitectura asegura la facilidad de la configuración radio con ayuda de software. Permite distintas soluciones de cobertura distribuida, es decir, se pueden establecer hasta tres radios diferentes de celda con el mismo procesador lo que posibilita una cobertura mayor tanto en escenarios urbanos con alta densidad de población como en escenarios de interiores (*indoor*).



Figura B- 2: Estación Base SC-100e de RedMAX 4C.

Este dispositivo proporciona una solución ideal para las comunicaciones punto a multipunto (PMP), escalable para cualquier red de acceso WiMAX. La estación base se puede utilizar en clústeres con sectores de hasta 60 grados, lo que permite soportar 200 flujos de datos y hasta 500 usuarios simultáneos por sector. Su sincronización GPS en tiempo real facilita la reutilización de frecuencias, permitiendo el uso más eficiente del espectro disponible y los canales, así como la reducción de la interferencia cuando se opera por división de tiempo dúplex (TDD) en las proximidades. Su hardware se puede actualizar fácilmente mediante descargas de software para dar cabida a futuras mejoras incluyendo soporte de IPv6, escalabilidad, clasificadores adicionales, normas de codificación alternativa, y el desarrollo continuo del estándar 802.16.

⁴⁶ Fuente: Redline communications,

<http://www.redlinecommunications.com/products/RedMAX.html>

En la siguiente tabla se muestra más detalladamente las especificaciones de la estación base SC-100e de RedMAX 4C.

Dimensions (H x W x D) - indoor unit:	43.18cm x 30.48cm x 4.45cm (17"x12"x1.75")
Dimensions (H x W x D) - RRH:	16.6cm x 26.8cm x 47.8cm (19"x11"x7")
Weight - indoor unit:	2.5 kg
Weight - RRH:	10.2 kg
Capacity:	One or two sector (optional) Up to 3 RRHs for distributed coverage
Power supply:	-48 V DC
Power consumption:	< 200W for single sector (IDU and RRH)
Operating temperature:	Indoor Unit 0 C to +40 C RRH -40 C to +55 C
Installation:	19" rack
WAN Interface:	100 Mbps RJ45 connector
Radio Specifications:	
Tx Power:	10W/40 dBm per antenna (43 dBm total)

Tabla B- 1: Especificaciones de SC-100e Base Station, RedMAX.

En la arquitectura WiMAX de nuestro proyecto, como se indica en las especificaciones de la SC-100e, se busca generar una potencia de transmisión máxima hasta 43 dBm.

En la Tabla B-2 se muestran las características WiMAX de la estación base.

- Scalable OFDMA access scheme - WiMAX Forum Certification Wave II Profile, including:
- TDD duplex mode
- Frequency Bands: 1800-1830 MHz, 2.5-2.7 GHz, 3.4-3.6 GHz
- Channel Bandwidth: 3.5/5/7/10 MHz
- Permutation: PUSC, FUSC, AMC2*3
- Convolutional turbo coding
- Hybrid ARQ (Chase combining)
- Ethernet/IP CS - Convergence sublayer
- Modulation: QPSK/16QAM/64QAM
- QoS: BE, nrtPS, rtPS, ertPS, UGS
- Encryption: AES-128
- Antenna Systems: MIMO advanced antenna system support including Matrix A/B/UL CSM and MRC receive diversity

Tabla B- 2: Características WiMAX de la estación base SC-100e.

Como podemos observar permite la técnica de OFDMA escalable para distintos anchos de banda de canal: 3.5, 5, 7 y 10 MHz, valor utilizado en nuestras simulaciones. También está diseñada para trabajar en la banda de 3.5 GHz con el modo dúplex de división en el tiempo.

B.2. Descripción de la antena de la estación base WiMAX.

En cada estación base necesitamos tres antenas sectoriales, concretamente con un sector de 120° tal y como hemos utilizado en las simulaciones. La ganancia de las antenas debe ser de 15 dBi. Hemos elegido la antena modelo 35 SD98120NV del fabricante Stella Doradus, que funciona a frecuencia 3,5 GHz y con un gran rendimiento; se muestra en la figura siguiente.



Figura B- 3: Antena 35 SD98120NV de Stella Doradus.

Las principales características descriptivas se enumeran a continuación:

- Fácil montar en postes o directamente a las paredes y puede ajustarse la inclinación.
- Diseñada para el uso de interior o al aire.
- Compatible con la tecnología IEEE 802.16 WiMAX.
- Diseñado para el uso en ambientes de alta densidad de RF.

Las especificaciones eléctricas se resumen en la Tabla B-3. Como vemos, tiene ganancia de 15 dBi, sector de 120° y frecuencia de operación 3,5 GHz cumpliendo los requisitos necesarios.

Electrical Specifications	
Gain	15dBi
3dB beam Pattern	120° x 7°
Bandwidth	3.4-3.6GHz
Reflection	-16.5dB
Front to Back Ratio	25dB
Polarization	Vertical
Power Rating	25W
Impedance	50 ohms

Tabla B- 3: Especificaciones eléctricas de la antena de la estación base.

Nota: Para nuestras simulaciones no hemos tenido en cuenta el diagrama de radiación vertical de la antena ya que su efecto es ínfimo, de apenas 0.1 dB.

B.3. Descripción de la estación suscriptora indoor de WiMAX.

Se trata de Subscriber Unit (SU-I) del suministrador RedMAX™, diseñado para ofrecer fiabilidad, rentabilidad y gran ancho de banda a la conectividad inalámbrica de banda ancha. Como líder en Productos WiMAX Forum Certified™, Redline ha diseñado su RedMAX SU-I para cumplir con los estándares IEEE 802.16d, proporcionando el máximo rendimiento de WiMAX a los usuarios finales.



Figura B- 4: Estación suscriptora SU-I (*indoor*), vista de frente y montada sobre un cristal.

Una simple auto-instalación por parte de los abonados y su antena integrada con indicadores LED de intensidad de la señal para la configuración rápida, hacen que el RedMAX SU-I sea una solución ideal para aplicaciones tanto empresariales como residenciales.

La muy baja latencia de RedMAX Redline SU-I garantiza una entrega segura en servicios sensibles al retraso tales como vídeo, voz sobre IP (VoIP), y datos de tráfico con prioridades. El SU-I RedMAX soporta interfaces de VoIP para ofrecer servicios de voz y datos de calidad de tráfico con acuerdos de nivel de servicio y calidad de servicio (QoS).

En la próxima tabla se mencionan las especificaciones de la unidad suscriptora.

System Capability:	Non-LOS Cellular-based Point-to-Multipoint
RF Band:	3.3-3.5; 3.4-3.6; and 3.6-3.8 GHz
Channel Size:	3.5 MHz, 7 MHz
Spectral Efficiency:	Up to 5 bps/Hz (over the air) Up to 3 bps/Hz (net to Ethernet)
Over the Air Rate:	Up to 35 Mbps (@7 MHz, rates depend on channel size)
Ethernet Data Rate:	Up to 23 Mbps (@7 MHz)
Maximum Tx Power:	Up to +24 dBm (region specific)

Rx Sensitivity:	Better than -98 dBm @ BPSK 1/2 (based on BER of 1x10e-6)
Modulation/Coding Rates:	Auto select: BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM 802.1p, 802.1Q VLAN port tagging
Coding Rates:	1/2, 3/4 and 2/3
Duplex Technique:	TDD (time division duplex) HD-FDD (Half Duplex Frequency Division Duplex)

Tabla B- 4: Especificaciones de Subscriber Unit *Indoor* (SU-I).

En la arquitectura WiMAX de nuestro proyecto, se busca generar una potencia de recepción máxima hasta 30 dBm, ó en unidades naturales 1 vatio.

B.4. Descripción de la tarjeta WiMAX Mobile para el ordenador.

La tarjeta para el PC RedMAX 4C™ Express (REX) es la última adición a la familia de productos Redline RedMAX 4C de WiMAX móvil. Es compacta y plug-and-play, está diseñada para su uso en portátiles y otros dispositivos equipados con una ranura para tarjetas Express, y permite a los operadores prestar los servicios personales de banda ancha demandados en el mercado actual.



Figura B- 5: RedMAX 4C™ Express (REX).

Como característica adicional, este exclusivo dispositivo viene con su propia estación de USB. REX ofrece un rendimiento excepcional: capacidades superiores para entornos NLOS y la baja latencia de la REX permite calidad de servicio de voz, vídeo y datos en una amplia gama de entornos. Los

usuarios pueden rápida y fácilmente establecer de una conexión de banda ancha desde cualquier lugar dentro del área de servicio de red.

Cumpliendo con el estándar IEEE 802.16e-2005 para WiMAX móvil, está diseñado para ser una solución de bajo costo para los suscriptores de acceso a servicios de datos de banda ancha desde una red WiMAX móvil.

System Description:	Mobile WiMAX Express Card WiMAX Forum Certification Wave II system profile
Physical Layer:	Scalable OFDMA (512/1024 FFT) with MIMO (Matrix A/Space Time Coding and Matrix B/Spatial Multiplexing support). Supports 2x2 downlink MIMO and collaborative uplink MIMO operation
MAC Attributes:	QoS: BE, nrtPS, rtPS, ertPS, UGS Hybrid ARQ with convolutional turbo codes
Duplex Technique:	TDD (time division duplex)
RF Band & Channel Size:	2.3-2.4 GHz, 2.496-2.69 GHz (5/10 MHz) and 3.3-3.8 GHz (3.5/5/7/10 MHz)
Mean Output Power:	23 dBm
Modulation:	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Forward Error Correction & Coding Rates:	Convolutional Turbo Coder/Decoder
Over the Air Encryption:	AES
Operating Temperature:	-0 C to 40 C
Antenna:	2 dBi omni-directional

Tabla B- 5: Características de la tarjeta Express para WiMAX Mobile.

B.5. Coste aproximado de las estaciones base WiMAX.

La elección de la estación base es un factor determinante en la instalación de WiMAX. Aunque su coste solo supone un 10% del coste total, si no se tiene cuidado en su elección puede incrementar los gastos OPEX, que representan hasta un 80% del coste total. Por ejemplo, una estación base WiMAX con 3 dB más de sensibilidad de recepción puede reducir hasta un 30% el coste total tal y como se explica en la Figura B-5.

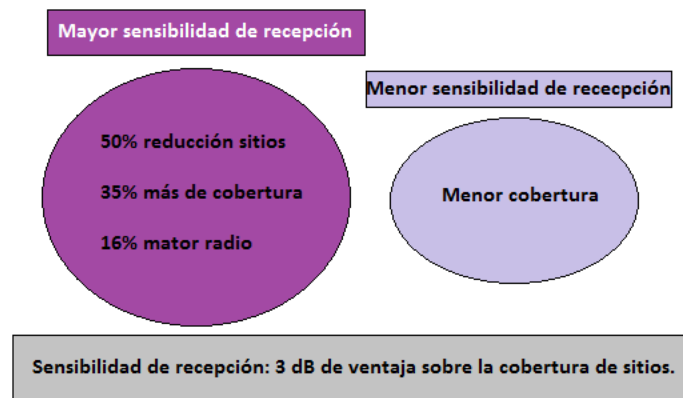


Figura B- 6: Ventajas de una estación base WiMAX con 3 dB más de sensibilidad de recepción.

Alvarion, empresa dedicada a la venta de estaciones base WiMAX, anunció su próxima generación de micro estaciones base WiMAX estarán disponibles por menos de 10.000 euros. Los precios de las estaciones base de UMTS, reportados por Unstrung, son inferiores a 24.000 dólares, aproximadamente 17.600 euros en estos días. Es un poco difícil comparar estas dos cifras ya que sería necesarios datos sobre los transceptores, el ancho de banda, la capacidad de dicha estación base... Además, hoy en día el coste actual de la instalación y adquisición del sitio radio, etc. es más dominante que el propio coste de la estación de la base.

Para estaciones base de Nortel o Alcatel Lucent (ALU), el precio aproximado de la estación base WiMAX ronda el valor entre 73.250 y 88.000 euros, de 100.000 a 120.000 dólares.

Aproximadamente el precio de tres antenas sectoriales y un mástil podrían costar alrededor de 1.500 euros, añadiendo el precio de la estación base que hemos mencionando en este apartado, 10.000 euros; el coste de cada estación base de cada celda incluyendo las antenas es 25.000 euros. Con este cálculo realizado a groso modo, adjuntamos en la Tabla B-5 un presupuesto del coste de las estaciones bases necesarias para el despliegue la aplicación WiMAX para usuarios portátiles en un escenario *indoor* para un requisito de descarga de 100 Mbyte/diario y un valor del tráfico de pico a promedio es de 2.

Ciudad	Número de celdas necesarias	Presupuesto (M €)
Madrid	1.657	41,425
Bagdad	2.305	57,625
Barcelona	738	18,45
Mosul	570	14,25

Tabla B- 6: Coste aproximado de las estaciones base necesarias en el despliegue de la aplicación WiMAX portátil indoor en distintas ciudades.

B.6. Otras estaciones base WiMAX.

A continuación se muestran más imágenes de otras estaciones base WiMAX.



Figura B- 7: Estación base Mobile WiMAX NTF-291 de Japan Radio Company (JRC).



Figura B- 8: Estación base BroadOne WX300 de Fujitsu.



Figura B- 9: Punto de acceso ExcelMAX de Winncom Technologies.



Figura B- 10: Antena de la estación base WiMax con ganancia de 16 dBi de Laird Technologies.



Figura B- 11: Estación base WiMAX de Nokia Flexi.



Figura B- 12: Estación base de Mobile Wimax de NaturalTeck.



Figura B- 13: Estación base WiMAX de Alcatel-Lucent en un entorno real.



Figura B- 14: Estación base de WiNETWORKS en una convención de tecnologías inalámbricas de banda ancha.

B.6. Otros elementos receptores WiMAX.



Figura B- 15: Módems USB WiMAX móvil.



Figura B- 16: Tarjeta WiMAX para la conexión inalámbrica del portátil de Samsung.

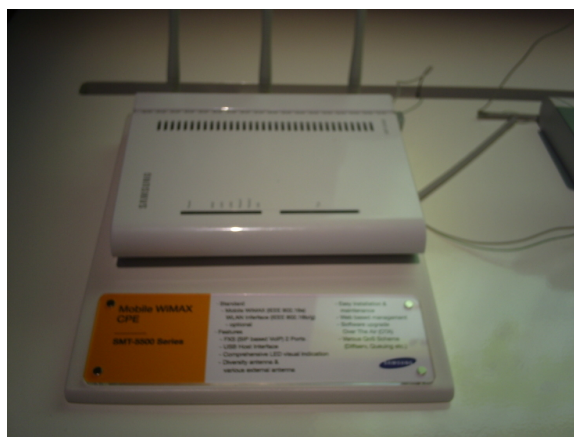


Figura B- 17: Equipo suscriptor del cliente de Samsung.



Figura B- 18: WiMAX USB dongles.

PRESUPUESTO

1. Ejecución Material

- Ordenador personal..... 1350 €
- Software..... 800 €
- Impresora laser..... 300 €
- Material de oficina..... 150 €

Total de ejecución Material..... 2.600 €

2. Gastos generales

- 16 % sobre Ejecución Material.....416 €

3. Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material.....156 €

4. Honorarios Proyecto

- 650 horas a 20 € / hora.....13.000 €

5. Material fungible

- Gastos de impresión.....75 €
- Encuadernación.....25 €

Total material fungible.....100 €

6. Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto.....16.272 €

7. I.V.A. aplicable

- 16% Subtotal Presupuesto..... 2.603,52 €

8. Total presupuesto

Total Presupuesto.....18.875,52 €

Madrid, Abril de 2010

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Sonia Villar Pascual

Ingeniero Superior de Telecomunicación

PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un estudio de las prestaciones de una red de acceso de banda ancha mediante WiMAX móvil (IEEE 802.16e) en distintos escenarios de comunicaciones. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.