

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESTUDIO COMPARATIVO DEL RENDIMIENTO ENTRE LTE FDD Y LTE TDD MEDIANTE EL SOFTWARE ICS DESIGNER

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN “ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES”

KARLA PAMELA TOAPANTA VENTURA

karla.toapanta@epn.edu.ec

DIRECTOR: PhD. MARTHA CECILIA PAREDES PAREDES

cecilia.paredes@epn.edu.ec

CODIRECTOR: MSc. ANDRÉS FERNANDO REYES CASTRO

andres.reyes@epn.edu.ec

Quito, enero 2019

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Karla Pamela Toapanta Ventura, bajo nuestra supervisión.

PhD. MARTHA CECILIA PAREDES PAREDES
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

MSc. ANDRÉS FERNANDO REYES CASTRO
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Karla Pamela Toapanta Ventura, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Karla Pamela Toapanta Ventura

DEDICATORIA

A mis padres y hermanas.

AGRADECIMIENTO

A mis padres por su amor incondicional y por guiarme en cada paso de mi vida.

A mis hermanas por su apoyo incondicional durante toda esta etapa de mi vida.

A mis padrinos Jaime y Estelita, mis tíos Julio y Mercedes, por su inmenso cariño y por los consejos brindados.

A mis amigos, con quienes he compartido grandes momentos durante todo este tiempo.

A la PhD. Cecilia Paredes y al MSc. Andrés Reyes por su guía durante la realización de mi Trabajo de Titulación. Gracias por compartir sus conocimientos y por cada uno de sus consejos a fin de culminar con éxito mi tesis.

A la Dra. Diana Navarro por brindarme la oportunidad de realizar mi Trabajo de Titulación en el Laboratorio de Investigación y Simulación del DETRI.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Alcance	2
1.3. Marco Teórico	2
1.3.1. Esquemas de duplexación.....	2
1.3.2. <i>Long Term Evolution</i> (LTE).....	5
1.3.3. Canales en LTE.....	10
1.3.4. Capa física	15
1.3.5. Diferencias entre LTE FDD y LTE TDD	30
2. METODOLOGÍA	32
2.1. Parámetros de evaluación.....	32
2.1.1. <i>Reference Signal Received Power</i> (RSRP)	32
2.1.2. <i>Reference Signal Received Quality</i> (RSRQ).....	33
2.1.3. <i>Signal to Noise plus Interference Ratio</i> (SNIR)	33
2.2. Diseño de las redes LTE (LTE FDD y LTE TDD)	34
2.2.1. Área de cobertura.....	34
2.2.2. Archivos de cartografía	35
2.2.3. Ubicación de las estaciones base.....	36
2.2.4. Parámetros del eNodeB	37
2.2.5. Parámetros del equipo de usuario	43
2.3. Modelos de propagación y geometría de difracción	44
2.3.1. Modelo Hata Extendido	45

2.3.2.	Geometría de difracción	46
2.3.3.	Modelo de propagación y geometría de difracción en ICS Designer.....	47
2.3.4.	Parámetros de <i>clutter</i>	47
2.4.	Herramientas de simulación.....	48
2.4.1.	<i>Tx/Rx Field Strenght (FS)</i>	49
2.4.2.	<i>SNIR maps</i>	49
2.4.3.	<i>Throughput mapping</i>	50
2.4.4.	<i>RSRQ map</i>	51
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
3.1.	Ejemplos de mapas de cobertura.....	52
3.2.	Asignación de recursos en enlace descendente	55
3.3.	Análisis del parámetro RSRP.....	56
3.3.1.	Análisis del área de cobertura	57
3.3.2.	Análisis del nivel de señal.....	58
3.4.	Análisis del parámetro SNIR	61
3.4.1.	Análisis del área de cobertura	61
3.4.2.	Análisis del nivel de señal.....	62
3.5.	Análisis del parámetro <i>throughput</i>	64
3.5.1.	Red LTE FDD.....	64
3.5.2.	Red LTE TDD.....	65
3.6.	Análisis del parámetro RSRQ	71
4.	CONCLUSIONES	74
4.1.	Conclusiones.....	74
4.2.	Recomendaciones.....	75
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
6.	ANEXOS.....	81
	ANEXO II. Hoja de datos de la Antena 824-960/2x1710-2170 MHz	82
	ORDEN DE EMPASTADO	84

RESUMEN

Este Trabajo de Titulación presenta un estudio comparativo del rendimiento de los dos tipos de duplexación permitidos dentro de la tecnología de comunicación celular LTE (*Long Term Evolution*). Un tipo de duplexación es para bandas emparejadas FDD (*Frequency Division Duplex*) y otro para bandas no emparejadas TDD (*Time Division Duplex*). La comparación se realiza mediante simulaciones en el software ICS Designer de las redes LTE FDD y LTE TDD, las cuales se han diseñado e implementado para un área geográfica de aproximadamente 5 km² en una zona norte de la ciudad de Quito. Estas redes utilizan la banda de frecuencias asignada para Ecuador (1700/2100 MHz).

Para la evaluación de las redes se analizan los parámetros RSRP (*Reference Signal Received Power*), RSRQ (*Reference Signal Received Quality*), SNIR (*Signal to Noise plus Interference Ratio*) y *throughput*. Para cada parámetro se ha obtenido un mapa con su respectivo porcentaje de cobertura.

A través de este estudio, los operadores de telefonía móvil contarán con información cuantitativa sobre las ventajas y problemas de implementar una red LTE FDD o LTE TDD en términos de calidad de la señal, además se debe considerar que en Ecuador aún no se ha implementado una red LTE TDD.

Adicionalmente, se incluye un manual de usuario de la configuración de estas redes en el software ICS Designer.

PALABRAS CLAVE: LTE, FDD, TDD, ICS Designer, RSRP, RSRQ, SNIR, throughput

ABSTRACT

The final career project presents a comparative study about the two type duplex modes allowed in the LTE (Long Term Evolution) cellular communication performance. The first one for paired spectrum FDD (Frequency Duplex Division) and the second one for unpaired spectrum TDD (Time Frequency Duplex). The comparison is realized through simulation in ICS Designer software of the LTE FDD and LTE TDD networks, which are designed and implemented for a geographical area of approximately 5 km² in the northern of the Quito city. These networks use the frequency band allocated to Ecuador (1700/2100 MHz).

For the network evaluation the parameters RSRP (Reference Signal Received Power), RSRQ (Reference Signal Received Quality), SNIR (Signal to Noise plus Interference Ratio) and throughput are analyzed. For each parameter, a coverage map with its respective percentage has been obtained.

This study allows the mobile operators will have a quantitative information about the advantages and inssues of LTE FDD and LTE TDD networks implementation in terms of signal quality. Moreover it should be considered that in Ecuador there is not a LTE network with TDD duplex mode.

Furthermore, a user manual of these networks configuration in the ICS Designer software is included.

KEYWORDS: LTE, FDD, TDD, ICS Designer, RSRP, RSRQ, SNIR, throughput

1. INTRODUCCIÓN

Long Term Evolution (LTE) es una tecnología de comunicación celular que fue introducida por el *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), con el objetivo de mejorar el rendimiento de las redes predecesoras. LTE permite la comunicación bidireccional entre la estación base y el terminal móvil lo cual posibilita la utilización de dos modos de duplexación: *Time Division Duplex* (TDD) y *Frequency Division Duplex* (FDD).

En la actualidad, las redes basadas en FDD se han implementado en la mayoría de países. Sin embargo, el futuro de las telecomunicaciones plantea el uso del esquema TDD debido a los beneficios que presenta sobre todo para la asignación del tráfico asimétrico. Además, existen operadores que utilizan TDD como un modo complementario para alcanzar altas velocidades. Según un reporte del *Global mobile Suppliers Association* (GSA) existen 100 sistemas LTE TDD desplegados comercialmente en 57 países, entre ellos los siguientes operadores: *Starhub* en Singapur, *T-Mobile* en Holanda, *China Mobile* y *China Telecom* FDD & TDD. Adicionalmente, el despliegue de ambos tipos de duplexación en una red LTE es un tema de estudio considerado en los últimos años.

En Ecuador existen redes LTE FDD desplegadas en las principales ciudades del territorio nacional, la investigación de una red LTE TDD es aún un tema inexplorado. Por tales razones, mediante esta investigación se da a conocer las ventajas y problemas que conlleva el uso de estos dos tipos de duplexación, además de brindar información a los operadores de telefonía móvil para que en un futuro en nuestro país se pueda desplegar una red LTE TDD y beneficiarnos de las nuevas tecnologías.

En el presente Trabajo de Titulación se comparan los dos modos de duplexación, *Frequency Division Duplex* (FDD) y *Time Division Duplex* (TDD), que se permiten en una red LTE. El análisis comparativo se lo realiza mediante simulaciones en el software ICS Designer de una red LTE FDD y LTE TDD en un área de la ciudad de Quito. El rendimiento se evalúa en términos de *Reference Signal Received Power* (RSRP), *Reference Signal Received Quality* (RSRQ), *Signal to Noise plus Interference Ratio* (SNIR) y *throughput*.

1.1. Objetivos

El objetivo general de este estudio técnico es:

- Comparar el rendimiento entre LTE FDD y LTE TDD mediante el software ICS Designer.

Los objetivos específicos son:

- Describir los conceptos fundamentales de la tecnología LTE y los tipos de duplexación FDD y TDD.
- Diseñar una red LTE TDD y una red LTE FDD.
- Simular las redes LTE en el software ICS DESIGNER.
- Evaluar los resultados obtenidos con base en la simulación.

1.2. Alcance

Se revisarán conceptos fundamentales de la tecnología LTE, los tipos de duplexación FDD y TDD. Además se buscará información de FDD y TDD en LTE mediante una breve revisión del *Release 8* del *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*.

A partir de la información obtenida se revisarán las ventajas y problemas que implica el uso de estos tipos de duplexación en LTE. De igual modo se establecerán parámetros que permitan la comparación del rendimiento entre las redes LTE FDD y LTE TDD.

Se diseñará una red LTE FDD y una red LTE TDD, para lo cual se trabajará con el espectro radioeléctrico de Ecuador para LTE en la banda de frecuencias de 1700/2100 MHz. Cada red contará con mínimo 3 radiobases con sectorización hexagonal, la localización de cada radiobase dependerá de la zona de trabajo.

Se utilizará el software ICS Designer en el cual se diseñará y configurará cada red, tomando en cuenta el ancho de banda, potencia, tipo de duplexación y ganancia de la antena. Se simulará cada red con el fin de evaluar en términos de: RSRP, RSRQ, SNIR y *throughput*. Para la simulación se escogerá el modelo de propagación Hata Extendido.

Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos en simulación, se establecerá y concluirá qué red presenta un mejor rendimiento.

1.3. Marco Teórico

En esta sección se abordarán todos los aspectos teóricos asociados al Trabajo de Titulación. Se iniciará con los esquemas de duplexación para luego abordar la tecnología LTE, en donde se irán revisando las diferencias entre LTE FDD y LTE TDD.

1.3.1. Esquemas de duplexación

La comunicación bidireccional entre la estación base y el terminal móvil requiere de esquemas de duplexación. La duplexación permite transmitir y recibir información en cada sentido, es decir, en enlace descendente (DL, *downlink*) y ascendente (UL, *uplink*) de forma simultánea.

FDD se utiliza en los sistemas *Global System for Mobile Communications (GSM)*, *Code Division Multiple Access 2000 (CDMA2000)*, *Universal Mobile Communications System (UMTS)* y *Long Term Evolution - Frequency Division Duplex (LTE FDD)*. Mientras que el modo de duplexación TDD se utiliza en los sistemas *Time Division Synchronous Code Division Multiple Access (TD-SCDMA)*, *Worldwide Interoperability for Microwave Access (WIMAX)* y *Time Division Long Term Evolution (TD-LTE)* [1].

LTE permite dos esquemas de duplexación, para las bandas de frecuencia emparejadas se utiliza *Frequency Division Duplex (FDD)* y para las bandas de frecuencia no emparejadas se utiliza *Time Division Duplex (TDD)* [2].

a) Frequency Division Duplex (FDD)

Para el tipo de duplexación FDD se utilizan dos frecuencias de portadora diferentes, una para enlace descendente y otra para enlace ascendente. En este esquema, el terminal móvil transmite y recibe datos al mismo tiempo [3], este concepto se observa en la Figura 1.1 (a). Las características de FDD se describen a continuación [4][5][6].

Uso de espectro emparejado: Los sistemas FDD requieren de espectro emparejado, que consiste en utilizar dos diferentes bandas de frecuencia para la comunicación en enlace descendente y ascendente. Sin embargo, con el transcurso del tiempo se complica encontrar grandes proporciones de bandas de frecuencias emparejadas para una red de gran capacidad.

Transmisión continua: En FDD se consideran diferentes frecuencias de portadora para cada dirección, la transmisión en enlace descendente y ascendente es simultánea y continua.

Mínima interferencia entre los enlaces descendente y ascendente: Los filtros de transmisión y recepción (también conocidos como filtros dúplex) aíslan las transmisiones entre los enlaces descendente y ascendente. También se utiliza una separación dúplex lo suficientemente grande en frecuencia.

Modos de transmisión: En una red LTE, el terminal móvil utiliza FDD *full-duplex*. Adicionalmente, se admite FDD *half-duplex* en el terminal móvil, la transmisión y recepción en un terminal específico se separa en frecuencia y en tiempo. La estación base utiliza FDD *full-duplex* dado que simultáneamente programa diferentes terminales móviles en enlace descendente y ascendente.

Mínimo retardo del servicio: El retardo del servicio es mínimo, debido a las transmisiones continuas.

No requiere sincronización: La sincronización del sistema puede brindar beneficios como la cancelación de interferencia y coordinación de la transmisión; sin embargo, no es obligación obtener sincronización en FDD.

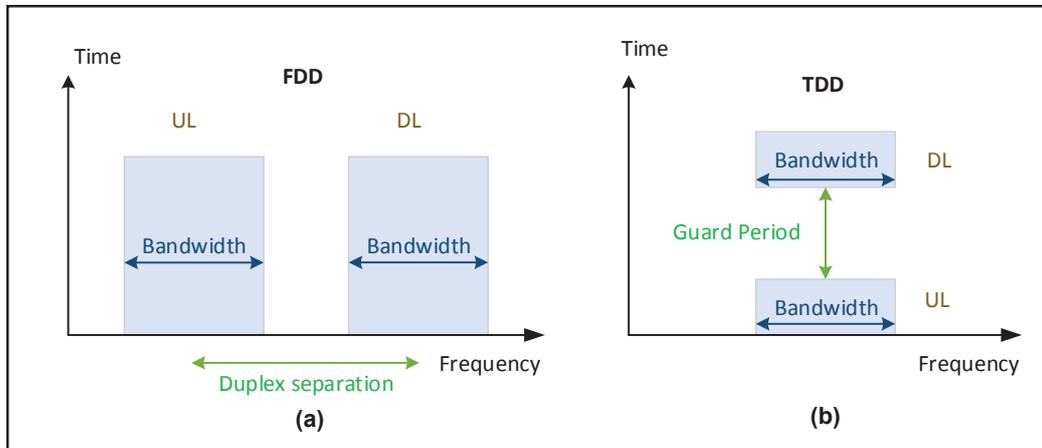


Figura 1.1. Esquemas de duplexación (a) FDD y (b) TDD [4]

b) Time Division Duplex (TDD)

En la duplexación TDD se utiliza la misma frecuencia de portadora para la transmisión en enlace descendente y ascendente. El modo TDD permite operar en modo *full-duplex* debido a que utiliza la misma banda de frecuencia y multiplexación en el tiempo [3], tal como se observa en la Figura 1.1 (b). Las características de TDD se describen a continuación [4][5][6].

Uso de espectro no emparejado: Los sistemas TDD requieren de espectro no emparejado, que se basa en utilizar una banda de frecuencia para la comunicación en enlace descendente y ascendente. Encontrar una banda de frecuencia para TDD es más factible en comparación con FDD debido a la disponibilidad del espectro no emparejado en el espectro de frecuencias.

Transmisión discontinua: Se programa las transmisiones en enlace descendente y ascendente en diferentes ranuras de tiempo en la misma frecuencia, la conmutación entre transmisión en enlace descendente y ascendente requiere de un periodo de tiempo.

Mínima interferencia entre enlace descendente y ascendente: Las estaciones base se sincronizan entre sí a nivel de trama, en las celdas vecinas se utiliza comúnmente la misma configuración de enlace descendente y ascendente para evitar interferencia entre ambas direcciones. Además, se requiere un periodo de guarda en la conmutación entre enlace descendente y ascendente a fin de evitar la interferencia entre las ranuras de tiempo.

Asignación flexible de recursos: La asignación de ranuras de tiempo de enlace descendente y ascendente es flexible para el tráfico asimétrico.

Mayor retardo del servicio: Las transmisiones no son continuas en el tiempo, de manera que es posible el retardo del servicio debido a que el tráfico debe esperar la conmutación entre enlace descendente y ascendente.

Requiere sincronización: Para evitar interferencias entre enlace descendente y ascendente se requiere un estricto nivel de sincronización del sistema.

Menor cobertura que FDD: Al utilizar TDD se consigue una menor cobertura que FDD, debido a la transmisión no continua en el tiempo. Sin embargo, en ambientes urbanos y suburbanos cumple con los requisitos de macro cobertura, esto es, soporta el tráfico asimétrico de una red TDD e incluso provee similar capacidad de cobertura en comparación con una red FDD.

1.3.2. Long Term Evolution (LTE)

En el año 2004, el 3GPP inició los estudios relacionados con la evolución de las redes de tercera generación (3G) hacia las redes de cuarta generación (4G) y, la tecnología LTE es el enlace entre ambas generaciones de telefonía móvil. La primera estandarización de las especificaciones de LTE se define en el *Release 8* del 3GPP y se encuentra en [7]. Surge con el objetivo de mejorar la velocidad de transmisión de datos y la eficiencia en la utilización del espectro, reducir la latencia, ampliar la cobertura y optimizar la transmisión de paquetes. Debido a la flexibilidad del espectro son posibles dos diferentes modos de duplexación (FDD y TDD), así como la configuración de diferentes tamaños del espectro.

a) Requerimientos de LTE

Al inicio del proceso de normalización de LTE se establecieron requerimientos para convertir a LTE en un sistema competitivo con respecto a los sistemas 3G. A continuación se indican algunos de los requerimientos.

Flexibilidad en el ancho de banda: Existen diferentes anchos de banda de transmisión tanto en enlace descendente como ascendente. LTE utiliza un ancho de banda variable de 1.4, 3, 5, 10, 15 o 20 MHz [3].

Velocidad de datos pico: La velocidad de datos pico se define como el *throughput* máximo por usuario. El *throughput* máximo ocurre cuando el ancho de banda total es asignado al usuario, se utiliza el esquema de modulación y codificación más alto, así como el máximo número de antenas permitidas. En el *Release 8* se define la velocidad máxima de datos

que se espera lograr con LTE, para enlace descendente y ascendente se establecieron valores de 100 Mbps y 50 Mbps respectivamente [2].

Cobertura y movilidad: LTE opera de forma óptima para celdas de tamaño de hasta 5 km, el rendimiento de esta tecnología se degrada al trabajar con celdas de mayor tamaño, es así que, soporta celdas de tamaño de hasta 100 km. Además, esta tecnología permite comunicarse con terminales móviles que se encuentran en movimiento a una velocidad de hasta 350 km/h. La transferencia entre celdas (*handover*) se produce sin interrupción para los terminales móviles, es decir, existe un retardo y pérdida de paquetes de voz que son imperceptibles para el usuario [2][8].

Latencia: Al aumentar la velocidad de datos se requiere de menor latencia, por tal razón, el tiempo de ida y vuelta de un paquete de datos entre el dispositivo móvil y la estación base debe ser de hasta 5 ms y un tiempo máximo de acceso de 300 ms [9].

Eficiencia espectral: La eficiencia espectral permite el despliegue de LTE en diferentes bandas de frecuencia con diferentes tamaños de espectro disponible, además, de la utilización de diferentes esquemas de duplexación [9][10].

Coexistencia: Se garantiza la coexistencia de la red LTE en la misma área geográfica y la misma ubicación de redes de generaciones anteriores como *GSM EDGE Radio Access Network* (GERAN) y *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN). Al igual que la coexistencia entre operadores en bandas adyacentes [11].

b) Arquitectura de red LTE

LTE está conformado de una red troncal, una red de acceso y el equipo de usuario. La red de acceso y la red troncal se encuentran totalmente conmutadas por paquetes, trabajan de forma conjunta a fin de proporcionar servicios de transferencia de paquetes *Internet Protocol* (IP) entre los equipos de usuario y las redes de paquetes externas [2][12].

En la Figura 1.2 se muestra la arquitectura de LTE, donde la estación base es conocida como *evolved Node B* (eNodeB), la red troncal como *Evolved Packet Core* (EPC) y la red de acceso como *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN). A continuación se revisan los elementos que componen la arquitectura de la red LTE.

User Equipment (UE)

En LTE se denomina UE al equipo de usuario empleado para la comunicación. Está compuesto de dos elementos: *Universal Subscriber Identity Module* (USIM) y *Mobile Equipment* (ME). El UE trabaja como interfaz para las aplicaciones finales del usuario. El

USIM se encarga de identificar al usuario, esta identidad del usuario se guarda en una tarjeta inteligente denominada *Universal Circuit Card* (UICC) [9][13].

La capacidad de la capa física del equipo de usuario se diferencia en términos de banda de frecuencia y velocidad de datos. El dispositivo móvil es capaz de soportar anchos de banda variable mientras opera en FDD o TDD, además, admite esquemas de transmisión *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) con diferente número de configuración de antenas. Un UE FDD necesita de un filtro dúplex para la transmisión y recepción simultánea, en cambio, el UE TDD no requiere de dicho filtro [3][10].

- **Categorías del equipo de usuario**

Los UE según el *Release 8* se pueden categorizar según ciertas características. Estas características se muestran en la Tabla 1.1, donde cada categoría admite un ancho de banda máximo de hasta 20 MHz [2][14].

Tabla 1.1. Categorías del UE

Categoría	1	2	3	4	5
Velocidad de datos pico en DL (Mbps)	10	50	100	150	300
Velocidad de datos pico en UL (Mbps)	5	25	50	50	75
Esquema de modulación en DL	QPSK, 16QAM y 64QAM				
Esquema de modulación en UL	QPSK 16QAM	QPSK 16QAM	QPSK 16QAM	QPSK 16QAM	QPSK 16QAM 64QAM
MIMO en DL	Opcional	2x2	2x2	2x2	4x4

Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)

Es la interfaz de radio de LTE diseñada para obtener baja latencia y alto rendimiento, mediante su estructura simplificada y la red con topología mallada permite mejorar el servicio de los terminales en movimiento [15].

La E-UTRAN está formada por eNodeBs y es responsable de todas las funciones relacionadas con el enlace de radio. Las siguientes funciones se establecen en el eNodeB [2][9][15]:

- Transmisión, recepción de las señales desde y hacia el equipo de usuario. Incluye la modulación, demodulación, codificación y decodificación del canal.
- Gestión de los recursos de radio. Se relaciona con las funciones de control de portadora de radio, control de admisión de radio, control de movilidad de radio,

programación y asignación dinámica de los recursos a los equipos de usuario en enlace descendente y ascendente, monitoreo de la utilización de los recursos.

- Para evitar problemas de sobrecarga comprime la cabecera de los paquetes IP, también realiza la función de descompresión de las cabeceras IP.
- Cifrado de los datos enviados a través de la interfaz de radio.
- Conectividad con la EPC.
- Responsable de varias funciones de la gestión de movilidad. Gestiona los trasposos de llamada, para lo cual el eNodeB debe controlar y analizar los niveles de potencia de la señal recibida por el equipo de usuario, y realizar sus propias mediciones de las señales recibidas.

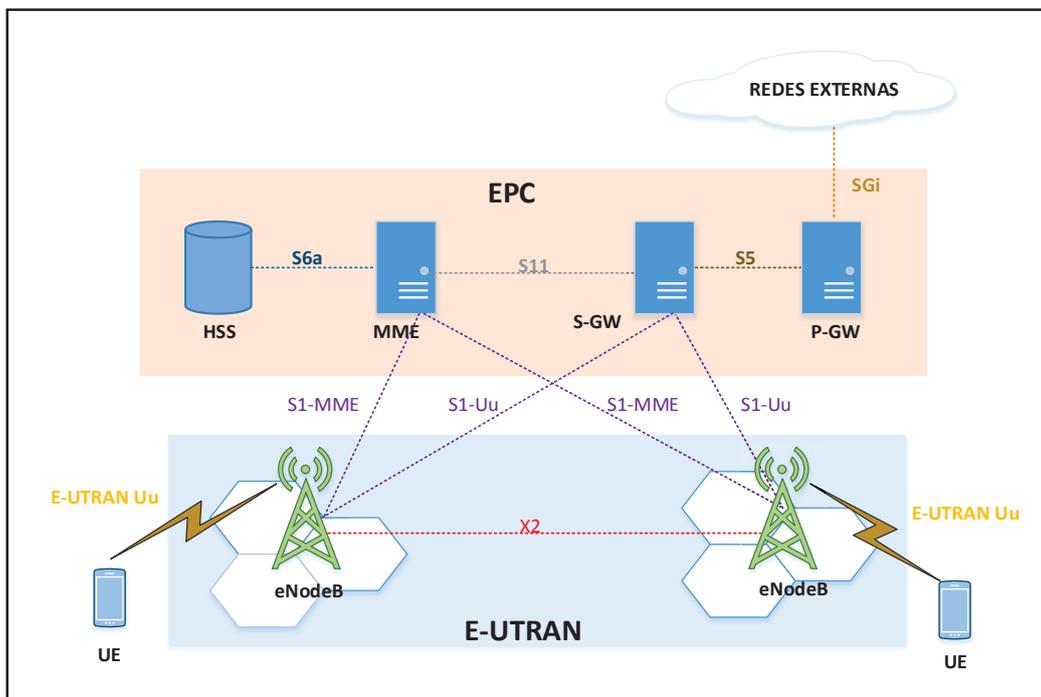


Figura 1.2. Arquitectura de la red LTE

Evolved Packet Core (EPC)

La red troncal EPC comprende elementos responsables de diferentes funciones durante la llamada o proceso de registro. Las entidades que conforman la EPC son: *Mobility Management Entity* (MME), *Packet Data Network Gateway* (P-GW) y *Serving Gateway* (S-GW). Dichas entidades en conjunto con el *Home Subscriber Server* (HSS) facilitan a los equipos de usuario acceder al servicio de conectividad IP por medio de redes externas conectadas a la red troncal EPC [3][13].

- ***Mobility Management Entity (MME)***

El MME se encarga de diversas funciones como autenticación del usuario, procesar la señalización entre el equipo de usuario y la red troncal, es responsable del mantenimiento, establecimiento y liberación de las portadoras. Para realizar la comunicación con el equipo terminal, el MME selecciona el S-GW y P-GW [2][9].

Adicionalmente, el MME calcula las claves de cifrado y protección del usuario, y controla la configuración de seguridad de los planos de control y de usuario por separado. También asigna a cada usuario un número temporal de identidad para evitar seguimientos no autorizados [9].

- ***Packet Data Network Gateway (P-GW)***

A través de este nodo se accede a redes de datos externas. Se encarga de inspeccionar los paquetes de datos para evitar actividades fraudulentas, encamina los paquetes desde la red troncal hacia las redes de paquetes externas y asigna la dirección IP al equipo de usuario cuando se establece la conexión con la red [9].

- ***Serving Gateway (S-GW)***

Este nodo dirige los datos hacia la EPC, también funciona como un punto de encaminamiento en el caso de cambio de red o traspaso de eNodeB. Realiza el filtrado de los paquetes categorizados como peligrosos o no adecuados que desean acceder a la EPC [9].

- ***Home Subscriber Server (HSS)***

Es una base de datos que se relaciona con la gestión de autenticación y autorización de los usuarios, además, almacena información acerca de la localización del usuario y la dirección IP. Esta base de datos abarca las funciones que realizaban las bases de datos *Home Location Register (HLR)* y *Authentication Center (AuC)* en las redes predecesoras [9].

Interfaces

Existen diferentes interfaces que permiten conectar los diferentes elementos de la arquitectura LTE y son las siguientes [3][6][16]:

- **Interfaz S1:** Es la interfaz que existe entre la E-UTRAN y EPC, cada eNodeB se conecta a la EPC a través de la interfaz S1. Mediante la red de acceso la interfaz

S1 se encarga de proporcionar a la red troncal los mecanismos necesarios para la gestión de acceso de los equipos de usuario.

- **Interfaz S1-MME:** Forma parte de la interfaz S1. Sirve para conectar al eNodeB con el MME de la EPC y se encarga de dar soporte al plano de control.
- **Interfaz S1-Uu:** Es parte de la interfaz S1. Sirve para conectar al eNodeB con el S-GW de la EPC y se encarga de dar soporte al plano de usuario.
- **Interfaz S5:** Conecta a las entidades S-GW y P-GW.
- **Interfaz S6a:** Se encarga de la conexión entre el MME y el HSS. Por esta interfaz se transfiere la información de autenticación y suscripción para autorizar y autenticar el acceso del usuario a la red.
- **Interfaz S11:** Conecta a las entidades MME y S-GW.
- **Interfaz SGi:** Es la interfaz que existe entre la P-GW y la red externa.
- **Interfaz X2:** Conecta las estaciones base (eNodeBs) entre sí para intercambiar mensajes de señalización y ayudar en la administración de los recursos de radio.
- **Interfaz E-UTRAN Uu:** Se encarga de conectar a los equipos de usuario con los eNodeBs.

1.3.3. Canales en LTE

Se denominan canales y señales a los flujos de información que se envían entre las diferentes capas de la pila de protocolos de la interfaz de radio de LTE. Existen 3 tipos de canal: canal lógico, canal de transporte y canal físico, adicionalmente, se encuentran las señales físicas [8]. Los diferentes canales y señales se describen en la presente subsección.

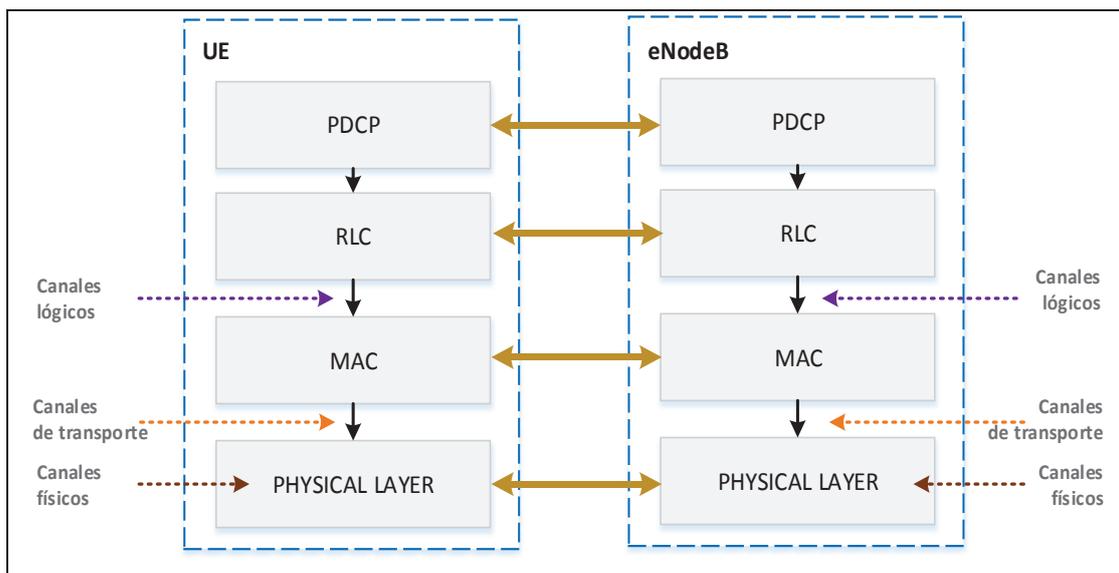


Figura 1.3. Pila de protocolos de la interfaz de radio de LTE

En la Figura 1.3 se ilustra la pila de protocolos de la interfaz de radio de LTE y sus diferentes capas. La capa física (*Physical Layer*) se relaciona con la interfaz física, la capa *Medium Access Control* (MAC) se encarga del enlace de datos y acceso. Por último, se tiene las capas *Radio Link Control* (RLC) y *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP).

a) Canales lógicos

Los canales lógicos transportan los flujos de información desde la capa superior hacia la capa MAC. Además, estos canales se clasifican en canales lógicos de control y de tráfico. Los canales lógicos de control transportan información del plano de control, el canal lógico de tráfico transporta información del plano de usuario. En la Tabla 1.2 se presentan las principales funciones de los canales lógicos [3][16].

Tabla 1.2. Canales lógicos de control y de tráfico

	Canal lógico	Principales funciones
Control	<i>Broadcast Control Channel</i> (BCCH)	Se utiliza para transmitir mensajes de información del sistema desde el eNodeB
	<i>Paging Control Channel</i> (PCCH)	El eNodeB utiliza este canal para enviar información de <i>paging</i> cuando no conoce la celda de ubicación del equipo de usuario.
	<i>Common Control Channel</i> (CCCH)	Transmite información de control entre los equipos de usuario y la red.
	<i>Dedicated Control Channel</i> (DCCH)	Es un canal punto a punto bidireccional que transmite información de control entre los equipos de usuario y la red.
Tráfico	<i>Dedicated Traffic Channel</i> (DTCH)	Es un canal punto a punto dedicado a un equipo de usuario para transferir información del usuario.

b) Canales de transporte

La capa MAC realiza el mapeo de los canales lógicos a canales de transporte, es decir, toma la información de los canales lógicos y genera los canales de transporte. A continuación, en la Tabla 1.3 se mencionan las principales funciones de los canales de transporte de enlace descendente y ascendente [9][17].

c) Canales físicos

Los canales físicos establecen los recursos apropiados para transmitir la información, mientras que la capa física se encarga del mapeo de canales de transporte a canales

físicos [8]. Las principales funciones de los canales físicos de enlace descendente y ascendente se indican en la Tabla 1.4 [3][9][16][18].

Tabla 1.3. Canales de transporte

	Canal de transporte	Principales funciones
Enlace descendente	<i>Broadcast Channel</i> (BCH)	Se asocia al canal lógico BCCH.
	<i>Downlink Shared Channel</i> (DL-SCH)	Transporta mensajes de datos de usuario y de señalización. La información del sistema que no se envía a través del BCH se transporta por el DL-SCH.
	<i>Paging Channel</i> (PCH)	Soporta al canal lógico PCCH y transporta los mensajes de <i>paging</i> a los equipos de usuario de toda la celda.
	<i>Multicast Channel</i> (MCH)	Transmite información de tipo <i>Multimedia Broadcast Multicast Services</i> (MBMS).
Enlace ascendente	<i>Uplink Shared Channel</i> (UL-SCH)	El equipo de usuario utiliza este canal para transportar mensajes de datos de usuario y mensajes de señalización.
	<i>Random Access Channel</i> (RACH)	Permite al equipo de usuario acceder a la red cuando este no se encuentra sincronizado en tiempo o no tiene recursos asignados para la transmisión.

Tabla 1.4. Canales físicos (Parte 1)

	Canal físico	Principales funciones
Enlace descendente	<i>Physical Broadcast Channel</i> (PBCH)	Soporta al canal de transporte BCH y transmite información del sistema.
	<i>Physical Downlink Control Channel</i> (PDCCH)	Informa al equipo de usuario acerca de la asignación de recursos en enlace descendente.
	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i> (PCFICH)	Informa al equipo de usuario acerca del número de símbolos OFDM utilizados por los canales PDCCH.
	<i>Physical Downlink Shared Channel</i> (PDSCH)	Transporta información relacionada con los datos de enlace descendente de los planos de control y de usuario.
	<i>Physical HARQ Indicator Channel</i> (PHICH):	Transporta los mensajes de <i>Acknowledgement</i> (ACK) o <i>Negative ACKnowledgement</i> (NACK) de <i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i> (HARQ) en respuesta a las transmisiones de enlace ascendente. HARQ es un protocolo de corrección de errores por retransmisión.
	<i>Physical Multicast Channel</i> (PMCH):	Transporta al canal de transporte MCH.

Tabla 1.4. Canales físicos (Parte 2)

	Canal físico	Principales funciones
Enlace ascendente	<i>Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)</i>	Transporta datos de tráfico y de control que son destinados a los planos de usuario y de control.
	<i>Physical Uplink Control Channel (PUCCH)</i>	Transporta los mensajes de ACK o NACK de HARQ en respuesta a las transmisiones de enlace descendente. Además, este canal no se transmite simultáneamente con el canal PUSCH desde el mismo dispositivo.
	<i>Physical Random Access Channel (PRACH)</i>	Transporta el preámbulo de acceso aleatorio que utiliza el terminal móvil cuando necesita realizar un acceso aleatorio, lo cual es la primera etapa de conexión del terminal móvil con el eNodeB.

d) Señales físicas

Estas señales se encargan de transportar información de sincronización temporal, identificación de la celda y de estimación del canal [17].

La señal *Reference Signal (RS)* se define para el enlace ascendente y existen dos tipos de esta señal, los cuales se mencionan a continuación.

- **Demodulation Reference Signal (DM-RS):** Las señales de referencia de demodulación se utilizan en la estación base para la estimación del canal y permiten la demodulación coherente de los canales físicos PUSCH y PUCCH. Una señal DM-RS se transmite junto con el canal físico PUSCH o PUCCH y utiliza la misma banda de frecuencia del canal físico correspondiente [6].
- **Sounding Reference Signal (SRS):** Las señales de referencia de sondeo se utilizan en la estación base para estimar el estado del canal de enlace ascendente a diferentes frecuencias. Con la medición que realiza el eNodeB se establece la ubicación en frecuencia de los recursos asignados al equipo de usuario y el *Modulation and Coding Scheme (MCS)* [6][19].

Las señales *Reference Signal (RS)* y *Synchronization Signal (SCH)* se definen para el enlace descendente. Los diferentes tipos de estas señales se indican a continuación.

- **Cell-Specific Reference Signal (CRS):** La señal de referencia específica de la celda se utiliza para realizar la demodulación coherente de la señal, implementar la multiplexación espacial y la diversidad de transmisión. También permite la medición de los parámetros *Reference Signal Received Power (RSRP)* y *Received Signal*

Strength Indicator (RSRQ). Esta señal se transmite en cada subtrama y se usa únicamente cuando la separación entre subportadoras es de 15 kHz [19].

- **Multimedia Broadcast over Single Frequency Network Reference Signal (MBSFN RS):** La señal de referencia MBSFN se transmite por el canal físico PMCH para realizar la demodulación coherente. Esta señal se define solo para la longitud de prefijo cíclico extendido y para espaciamiento entre subportadoras de 15 o 7,5 kHz [19].
- **UE-specific RS:** La señal de referencia específica del equipo de usuario se utiliza para la conformación de haces y demodulación del canal PDSCH. Esta señal coexiste con la señal de referencia específica de la celda y se encuentra en los bloques de recursos asignados al equipo de usuario [19].

Dos tipos de señales de sincronización se emiten en cada celda: *Primary Synchronization Signal* (PSS) y *Secondary Synchronization Signal* (SSS).

- **Primary Synchronization Signal (PSS):** La señal de sincronización primaria se encarga de la sincronización en tiempo a nivel de subtrama, esto lo realiza con la ayuda de procedimientos de correlación entre la señal recibida y una secuencia de referencia previamente guardada en el receptor. Se encarga de la sincronización en tiempo a nivel de símbolo OFDM, de ranura de tiempo y de media trama, así como de la sincronización en frecuencia [19][20].
- **Secondary Synchronization Signal (SSS):** La señal de sincronización secundaria se encarga de la sincronización en tiempo a nivel de trama mediante procedimientos de correlación, determina el tipo de duplexación y longitud del prefijo cíclico [20].

En la SSS, el número y posición de subportadoras es similar a PSS. Además, esta señal corresponde a una secuencia formada por la concatenación intercalada de dos secuencias binarias de longitud 31, una secuencia de rango par y otra de rango impar [21].

Cuando el terminal móvil se activa, realiza los procedimientos de sincronización y adquisición inicial de parámetros. Mediante las señales de sincronización se identifica la celda a la cual se sincroniza el equipo de usuario y posteriormente se identifica los elementos de recursos en los que las señales de referencia serán ubicadas, como se ilustra en la Figura 1.4. Las señales de sincronización siempre ocupan 62 subportadoras debido a que el procedimiento de búsqueda de celda es el mismo independientemente del ancho de banda del canal [17][21].

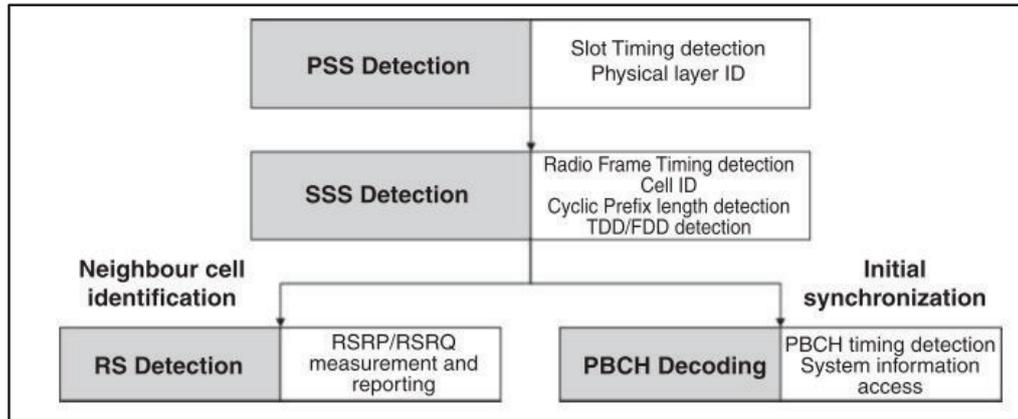


Figura 1.4. Procedimiento de búsqueda de celda [2]

1.3.4. Capa física

La capa física realiza la transmisión de la información a través del canal de radio. Realiza funciones de codificación del canal, modulación, procesos relacionados a las técnicas de múltiples antenas, mapeo de la señal a recursos físicos, entre otros [20].

a) Bandas de frecuencia

LTE opera en diversos anchos de banda de frecuencia para obtener mayor cobertura en diferentes áreas, ya sea en una zona urbana densamente poblada, suburbana o un ambiente rural [9].

En el *Release 8* del 3GPP se definen alrededor de 40 bandas, las bandas disponibles se listan en la Tabla 1.5, donde se especifica el tipo de duplexación para cada banda.

Tabla 1.5. Bandas de frecuencias según el tipo de duplexación (Parte 1) [2][22]

Banda	Enlace ascendente (UL)		Enlace descendente (DL)		Separación de banda UL-DL	Separación dúplex [MHz]	Modo dúplex
	F_{UL_baja} [MHz]	F_{UL_alta} [MHz]	F_{DL_baja} [MHz]	F_{DL_alta} [MHz]	$F_{DL_baja} - F_{UL_alta}$ [MHz]		
1	1920	1980	2110	2170	130	190	FDD
2	1850	1910	1930	1990	20	80	FDD
3	1710	1785	1805	1880	20	95	FDD
4	1710	1755	2110	2155	355	400	FDD
5	824	849	869	894	20	45	FDD
6	830	840	875	885	35	45	FDD
7	2500	2570	2620	2690	50	120	FDD
8	880	915	925	960	10	45	FDD
9	1749,9	1784,9	1844,9	1879,9	60	95	FDD
10	1710	1770	2110	2170	340	400	FDD
11	1427,9	1452,9	1475,9	1500,9	23	48	FDD
12	698	716	728	746	12	30	FDD
13	777	787	746	756	21	31	FDD

Tabla 1.5. Bandas de frecuencias según el tipo de duplexación (Parte 2) [2][22]

Banda	Enlace ascendente (UL)		Enlace descendente (DL)		Separación de banda UL-DL	Separación dúplex [MHz]	Modo dúplex
	F_{UL_baja} [MHz]	F_{UL_alta} [MHz]	F_{DL_baja} [MHz]	F_{DL_alta} [MHz]	$F_{DL_baja} - F_{UL_alta}$ [MHz]		
14	788	798	758	768	20	30	FDD
...
17	704	716	734	746	18	30	FDD
...
33	1900	1920	1900	1920	N/A	N/A	TDD
34	2010	2025	2010	2025	N/A	N/A	TDD
35	1850	1990	1850	1990	N/A	N/A	TDD
36	1930	1990	1930	1990	N/A	N/A	TDD
37	1910	1930	1910	1930	N/A	N/A	TDD
38	2570	2620	2570	2620	N/A	N/A	TDD
39	1880	1920	1880	1920	N/A	N/A	TDD
40	2300	2400	2300	2400	N/A	N/A	TDD

Actualmente en Ecuador existen redes LTE FDD, los operadores que ofrecen servicios a través de la tecnología LTE operan en la banda de frecuencia de 1900 MHz, 1700/2100 MHz (banda AWS) y 700 MHz [23].

b) Ancho de banda del canal

Es el ancho de banda que soporta una portadora según la configuración del ancho de banda de transmisión en enlace descendente y ascendente de una celda, se mide en MHz y es utilizado como referencia para los requerimientos de radiofrecuencia del transmisor y receptor [22]. En la Tabla 1.6 se indica el número de *Resource Blocks* (N_{RB}) según el ancho de banda del canal. El término *Resource Block* se describirá en las siguientes secciones.

Tabla 1.6. Asignación de bloques de recursos según el ancho de banda del canal [22]

Ancho de banda del canal (BW_{canal})	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de <i>Resource Blocks</i> (N_{RB})	6	15	25	50	75	100

c) Técnicas de modulación

En esta sección se mencionan las técnicas de modulación digital utilizadas en LTE y sus respectivas características.

Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

La modulación por desplazamiento cuaternario de fase es una técnica M -aria, donde el término M representa las posibles combinaciones de salida para una determinada cantidad de variables binarias. En QPSK, M es igual a 4 y modula 2 bits simultáneamente a fin de obtener 4 diferentes fases de salida para una sola frecuencia de portadora. QPSK codifica 2 bits por símbolo y su diagrama de constelación se observa en la Figura 1.5 (a) [24][25].

Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

La modulación de amplitud en cuadratura es una modulación de amplitud de dos portadoras separadas 90 grados en fase. Las señales moduladas se suman y se obtiene una onda resultante, la información se encuentra tanto en la fase como en la amplitud de la portadora a transmitir [15][25], las opciones para LTE son:

- **16QAM**

Es una técnica M -aria en donde M es igual a 16. En esta técnica de modulación, los bits de entrada forman grupos de 4 bits y se varía tanto en la fase como en la amplitud de la portadora de transmisión. En el diagrama de constelación para 16QAM se observan 16 posibles combinaciones de bits, tal como se muestra en la Figura 1.5 (b) [24].

- **64QAM**

Es una técnica M -aria en donde M es igual a 64. En esta técnica de modulación, los bits de entrada forman grupos de 6 bits, se varía la amplitud y fase de la portadora de transmisión. En la Figura 1.5 (c) se observa que existen 64 posibles combinaciones de bits.

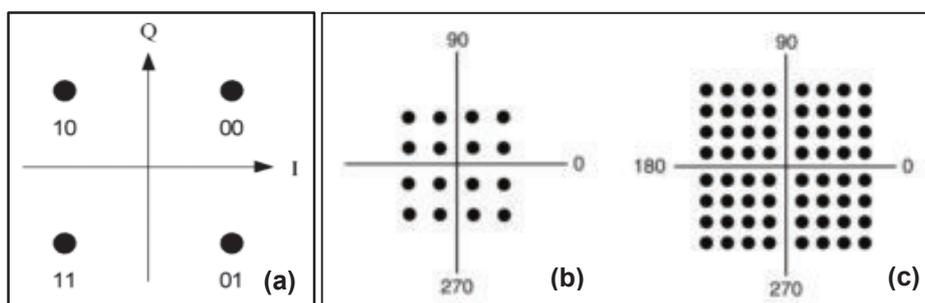


Figura 1.5. Diagrama de constelación para (a) QPSK [26], (b)16QAM y (c) 64QAM [25]

d) Técnicas de acceso múltiple en la interfaz de radio

En LTE se emplean dos técnicas de acceso múltiple que permiten lograr mayor capacidad y uso eficiente de los recursos. Las técnicas *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) y *Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access* (SC-FDMA) se

utilizan en LTE para el enlace descendente y ascendente respectivamente. Cada una se describe a continuación [12].

Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)

El método OFDMA se basa en *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) que divide el ancho de banda disponible en múltiples subportadoras de banda estrecha ortogonales entre sí. La superposición entre subportadoras proporciona una alta eficiencia espectral y reduce la *Inter-Carrier Interference* (ICI). Un periodo de guarda llamado prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) se añade al principio de cada símbolo OFDM para mantener la ortogonalidad entre las subportadoras y eliminar la *Inter-symbol Interference* (ISI) [14].

El prefijo cíclico es un periodo de guarda que se inserta entre cada símbolo para eliminar la interferencia entre símbolos debido a la dispersión del retardo por el multirrayecto, al utilizar el prefijo cíclico se copian las últimas muestras del símbolo (N_g) al inicio del mismo símbolo OFDM. Si el prefijo cíclico es mayor que la dispersión del retardo en el canal de radio y cada símbolo OFDM se extiende cíclicamente en el periodo de guarda, es posible eliminar por completo la interferencia entre símbolos [21].

Pero a diferencia de OFDM, en OFDMA las subportadoras son distribuidas simultáneamente a diferentes usuarios en diferentes ranuras de tiempo, permitiendo a múltiples usuarios recibir datos simultáneamente de diferentes flujos de información [9].

El procesamiento de la señal OFDMA consiste en que los bits de la señal de entrada en el transmisor pasan por el proceso de conversión de serie a paralelo para formar un determinado número de flujos de información (N), posteriormente el flujo de información es asignado a diferentes subportadoras. Luego, se aplica la *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) de N muestras para obtener la señal en el tiempo, se realiza el proceso de conversión de paralelo a serie y se agrega el prefijo cíclico. Finalmente, la señal digital se convierte en señal analógica y se transmite por el canal. Cabe señalar que, las subportadoras transportan símbolos que pertenecen a diferentes usuarios, por lo cual es posible transmitir de forma simultánea los diferentes flujos de información que pertenecen a cada usuario [27].

Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA)

La técnica de modulación SC-FDMA comparte los mismos principios que OFDM. Pero se realiza la operación *Discrete Fourier Transform* (DFT) antes de la IFFT en el lado del transmisor con el fin de reducir el *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR). Los símbolos de

datos se propagan sobre todas las subportadoras que transportan la información y se genera una estructura de portadora única virtual [14].

Para el enlace ascendente se busca reducir el consumo de potencia pico en el equipo de usuario, por tal razón, se usa la técnica SC-FDMA dado que ofrece una menor PAPR en comparación con OFDMA [27].

A diferencia de OFDMA, la asignación de subportadoras se da a un único usuario y las subportadoras deben ser contiguas. El uso de la subportadora central se restringe debido al uso de la DFT [27].

e) Técnicas de múltiples antenas

En LTE, estas técnicas son esenciales para mejorar la cobertura y el *throughput*. Las técnicas que permiten utilizar múltiples antenas para transmisión y recepción son: diversidad espacial, *beamforming* y multiplexación espacial, tal como se observa en la Figura 1.6. Dichas técnicas se describen a continuación.

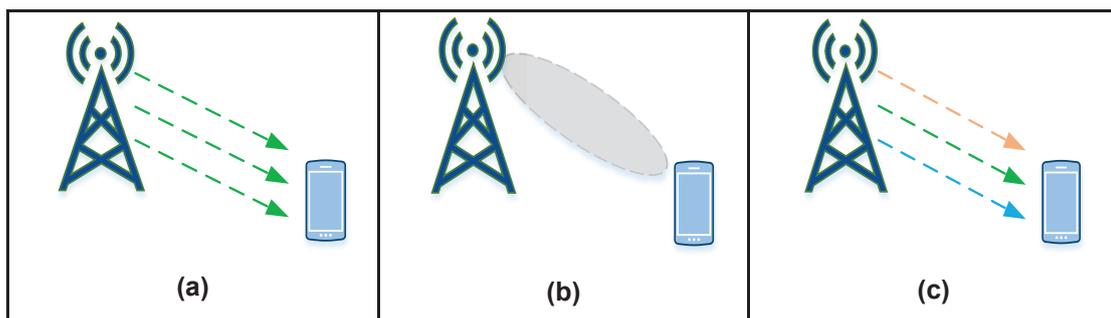


Figura 1.6. Técnicas de múltiples antenas en LTE: (a) diversidad espacial, (b) *beamforming* y (c) multiplexación espacial

Diversidad espacial

La diversidad consiste en transmitir réplicas de la señal sobre un canal con *fading* (desvanecimiento) de forma que cada réplica se desvanece independientemente de las demás en diferente tiempo.

La diversidad espacial se utiliza para combatir el desvanecimiento de la señal, que se refiere a la variación en tiempo de la intensidad de la señal recibida, con el objetivo de mejorar la confiabilidad del enlace de comunicación. Adicionalmente, en la Figura 1.6 (a) se presenta un esquema de la diversidad espacial, en donde las réplicas se transmiten a través de diferentes caminos entre el transmisor y el receptor mediante la utilización de múltiples antenas [28].

Beamforming o conformación de haces

En la Figura 1.6 (b) se ilustra un esquema de la técnica *beamforming* o conformación de haces. Esta técnica utiliza arreglos de antenas en la estación base para mejorar la cobertura en áreas específicas de la celda a través de la concentración de la energía en una o más direcciones [2].

Multiplexación espacial

La multiplexación espacial se refiere a la transmisión de múltiples flujos de información (*spatial streaming*) a través de múltiples trayectorias. Al utilizar la técnica de multiplexación espacial, el transmisor y el receptor pueden tener múltiples antenas que permiten enviar varios flujos de información de forma paralela en la misma banda de frecuencias, tal como se ilustra en el esquema de la Figura 1.6 (c), de modo que se incrementa el *throughput* sin aumentar el ancho de banda requerido [28].

Por lo general, la multiplexación espacial se describe como *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). MIMO se refiere al uso de múltiples antenas en ambos extremos del enlace de comunicación. Tal como se observa en la Figura 1.7, se tiene un sistema $N_t \times N_r$ antenas, donde N_t representa el número de antenas de transmisión y N_r indica el número de antenas de recepción [28]. A continuación, se realiza una breve descripción de los esquemas MIMO en LTE.

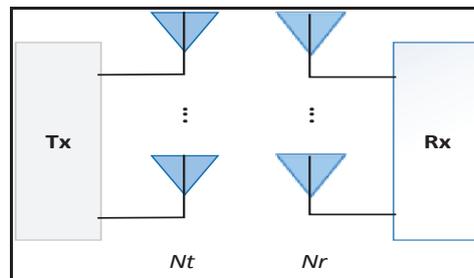


Figura 1.7. Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Single-User MIMO (SU-MIMO)

En esta técnica existe un enlace punto a punto entre las múltiples antenas de la estación base y un terminal móvil [2], tal como se indica en la Figura 1.8 (a). Existen dos tipos de técnica SU-MIMO y se describen a continuación.

- **Single-User MIMO Spatial Diversity (SU-MIMO SD)**

Este esquema emplea la técnica de diversidad espacial, además, utiliza múltiples antenas para transmitir el mismo flujo de información de manera simultánea y con distinta

codificación hacia el usuario. Al existir errores en la transmisión se perderán distintos bits en las diferentes trayectorias; sin embargo, en el receptor se tendrá una copia de los bits enviados, la información afectada se puede recuperar por el uso de la diversidad espacial [29][30].

- **Single-User MIMO Spatial Multiplexing (SU-MIMO SM)**

Este esquema emplea la técnica de multiplexación espacial, además, utiliza varias antenas para transmitir datos de diferentes flujos de información de forma simultánea. La información se transmite por diferentes antenas transmisoras en la misma frecuencia hacia el usuario [29][30].

Multi-User MIMO (MU-MIMO)

En esta técnica se crea un enlace entre varios terminales móviles y una estación base en común, tal como se observa en la Figura 1.8 (b), los equipos de usuario se comunican de forma simultánea con la estación base y utilizan los mismos recursos en tiempo y frecuencia. MU-MIMO permite aumentar el *throughput* a nivel de celda y no solo de un terminal móvil [2][8].

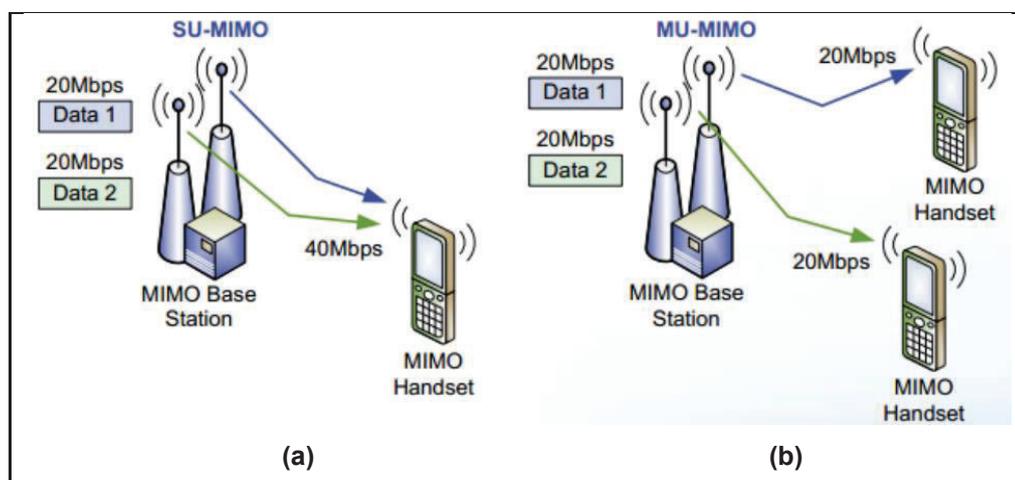


Figura 1.8. Esquemas MIMO: (a) SU-MIMO y (b) MU-MIMO [31]

f) Estructura de la trama

En la trama LTE a nivel físico, los recursos en tiempo y frecuencia para cada puerto de antena de transmisión parten de la división de la trama de 10 ms. La trama se subdivide en 10 subtramas de 1 ms, y cada subtrama se define como dos ranuras de tiempo (*time slot*) consecutivas, cada ranura de tiempo tiene una duración de 0,5 ms. El periodo mínimo que utiliza el usuario o estación base para transmitir es el de una subtrama, a este periodo de tiempo se lo conoce como *Transmission Time Interval* (TTI) [2][18].

En LTE, la unidad de tiempo base se expresa como $T_s = 32,552 \text{ ns}$, tanto en enlace descendente como ascendente, la trama LTE tiene una duración en tiempo de $T_f = 307200 \times T_s = 10 \text{ ms}$.

Existen dos estructuras de trama LTE. La estructura de la trama tipo 1 se emplea en FDD y la estructura de la trama tipo 2 se utiliza en TDD [18].

Estructura de la trama tipo 1

El tipo de duplexación FDD utiliza la estructura de la trama tipo 1. La trama se conforma por 20 ranuras de tiempo numeradas de 0 a 19, además, cada ranura de tiempo tiene una longitud de $T_{slot} = 15360 \times T_s = 0,5 \text{ ms}$ [18]. En la Figura 1.9 se muestra la estructura de la trama tipo 1, donde además se indica el tiempo de duración de la trama (T_f) y el tiempo de duración de una ranura de tiempo (T_{slot}) en términos de la unidad de tiempo base (T_s) en ms, por último se señala el número de subtrama y de ranura de tiempo.

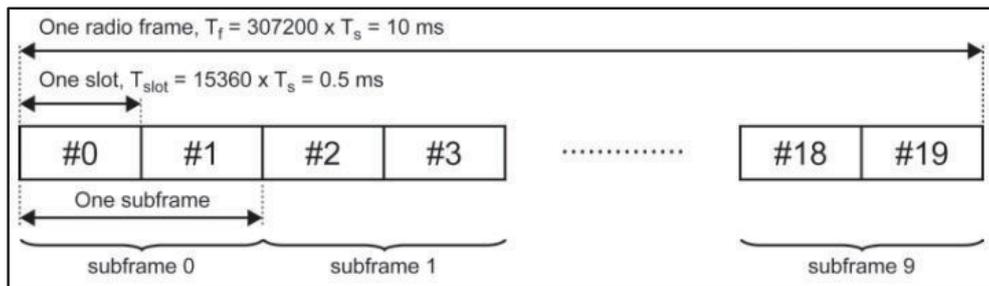


Figura 1.9. Estructura de la trama tipo 1 [21]

Para FDD, las 10 subtramas que conforman la trama tipo 1 se encuentran disponibles para transmitir los diferentes canales y señales en enlace descendente, así mismo, existen 10 subtramas disponibles para transmitir en enlace ascendente. Cabe indicar que, las transmisiones en enlace descendente y ascendente se separan en frecuencia [18].

Estructura de la trama tipo 2

El tipo de duplexación TDD utiliza la estructura de la trama tipo 2. Al igual que FDD, la trama tiene una longitud de $T_f = 10 \text{ ms}$ y se conforma por 20 ranuras de tiempo, además, la trama se divide en dos medias tramas con una duración en tiempo de 5 ms cada una. La media trama se conforma de 5 subtramas, donde cada subtrama tiene una longitud de 1 ms [18].

Un subconjunto de las subtramas se utiliza para transmitir los diferentes canales y señales en enlace ascendente, las subtramas restantes son asignadas para transmitir en enlace descendente y para ser subtramas especiales.

Para la operación de TDD, la estructura de la trama tipo 2 tiene 7 configuraciones diferentes [18]. Cada configuración expresa la relación que existe entre enlace descendente y ascendente, también indica la periodicidad del punto de conmutación. El punto de conmutación permite cambiar de enlace descendente a ascendente cada 5 o 10 ms, dependiendo de la configuración de la trama tipo 2 [2].

En la Figura 1.10 se observa la estructura de la trama tipo 2 con punto de conmutación de periodicidad de 5 ms. Igualmente, TDD utiliza dos medias tramas, donde cada media trama se conforma por 5 subtramas que son: 4 subtramas normales y 1 subtrama especial. La subtrama especial consta de 3 campos especiales: *Downlink Pilot Time Slot (DwPTS)*, *Guard Period (GP)* y *Uplink Pilot Time Slot (UpPTS)*, la duración total de los campos especiales es de 1 ms [18].

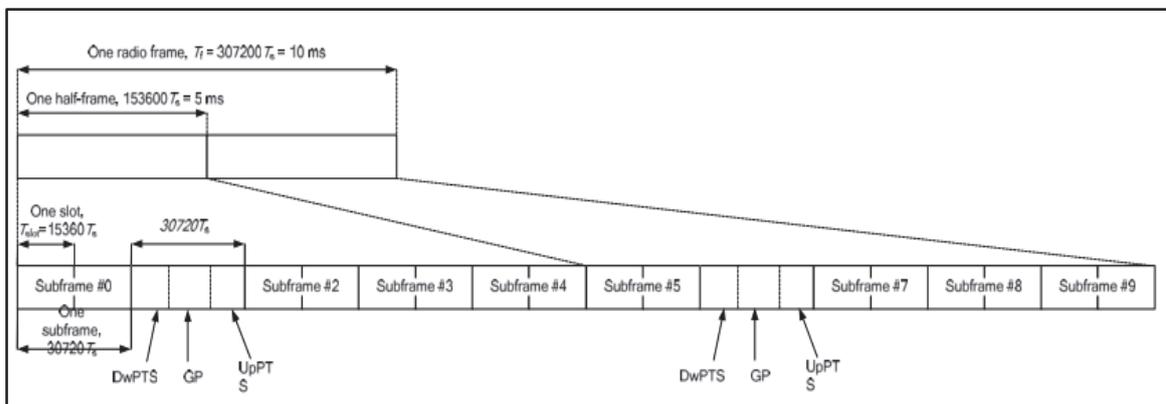


Figura 1.10. Estructura de la trama TDD con periodicidad de punto de conmutación de 5ms [18]

En la estructura de la trama tipo 2 con punto de conmutación de periodicidad de 10 ms existe únicamente una subtrama especial en la primera media trama [18].

Las 7 configuraciones diferentes de enlace ascendente y descendente de la trama tipo 2 se observan en la Tabla 1.7, donde:

- D indica que la subtrama se encuentra reservada para transmisiones en enlace descendente.
- U indica que la subtrama se encuentra reservada para transmisiones en enlace ascendente.
- S muestra que se trata de una subtrama especial con los campos DwPTS, UpPTS y GP.
- Las subtramas 0 y 5, y el campo DwPTS se reservan para transmitir en enlace descendente.

- El campo UpPTS y la subtrama posterior a la subtrama especial se reservan para transmitir en enlace ascendente.

Tabla 1.7. Configuraciones UL-DL de la trama tipo 2 [18]

Configuración UL-DL	Periodicidad del punto de conmutación	Número de subtrama									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Con respecto a la subtrama especial, la longitud de los campos DwPTS y UpPTS va de acuerdo con la configuración variable de la subtrama especial [18], tal como se observa en la Tabla 1.8.

Tabla 1.8. Configuración de la subtrama especial: longitud de los campos DwPTS y UpPTS

Configuración	Prefijo cíclico normal en DL			Prefijo cíclico extendido en DL		
	DwPTS	UpPTS		DwPTS	UpPTS	
		CP normal en UL	CP extendido en UL		CP normal en UL	CP extendido en UL
0	$6592 \times T_s$	$2192 \times T_s$	$2560 \times T_s$	$7680 \times T_s$	$2192 \times T_s$	$2560 \times T_s$
1	$19760 \times T_s$			$20480 \times T_s$		
2	$21952 \times T_s$			$23040 \times T_s$		
3	$24144 \times T_s$			$25600 \times T_s$		
4	$26336 \times T_s$	$4383 \times T_s$	$5120 \times T_s$	$7680 \times T_s$	$4383 \times T_s$	$5120 \times T_s$
5	$6592 \times T_s$			$20480 \times T_s$		
6	$19760 \times T_s$			$23040 \times T_s$		
7	$21952 \times T_s$					
8	$24144 \times T_s$					

La subtrama especial posee una configuración variable [20][32], donde:

- El campo DwPTS se utiliza para la sincronización en enlace descendente y para transportar señales de referencia o datos.
- El campo UpPTS se utiliza para la sincronización en enlace ascendente, transmite el preámbulo corto de acceso aleatorio y puede transportar señales de referencia o datos.

- La longitud del campo GP depende de los campos DwPTS y UpPTS. El campo GP evita la interferencia entre las transmisiones en enlace descendente y ascendente, además, el periodo de guarda es el punto de conmutación.

g) Estructura de la ranura de tiempo

Cada ranura de tiempo se conforma por 3, 6 o 7 símbolos OFDM, un símbolo corresponde al número de bits según la modulación digital utilizada. Con modulación QPSK se obtienen 4 símbolos diferentes, con 16QAM se obtienen 16 símbolos diferentes y con 64QAM se obtienen 64 símbolos diferentes [19].

La unidad de tiempo base (T_s) corresponde a una frecuencia de muestreo (f_s) de 30,72 MHz. Para obtener la frecuencia de muestreo se toma en cuenta la separación entre subportadoras (Δf) de 15 kHz y el tamaño máximo de muestras FFT (N_{FFT}) de 2048 para generar los símbolos OFDM [11].

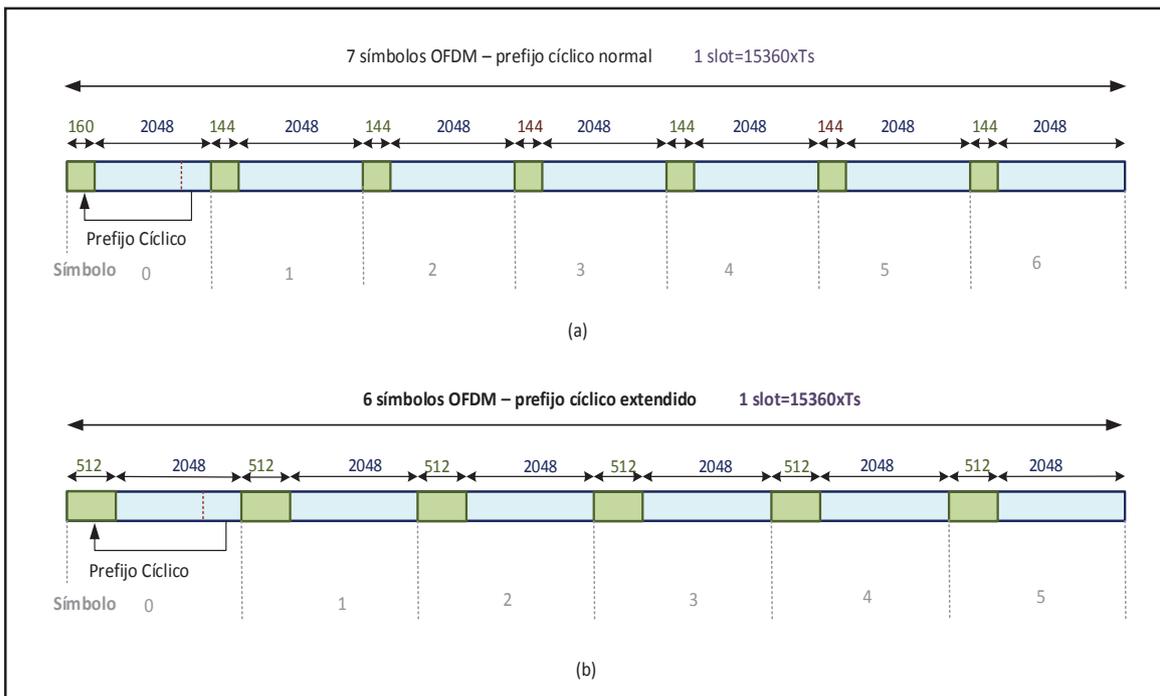


Figura 1.11. Estructura de una ranura de tiempo con: (a) configuración de prefijo cíclico normal y (b) configuración de prefijo cíclico extendido [19]

Existen 2 tipos de configuración de la longitud del prefijo cíclico: prefijo cíclico normal y prefijo cíclico extendido. Con el prefijo cíclico normal se dispone de 7 símbolos OFDM tal como se ilustra en la Figura 1.11 (a), con prefijo cíclico extendido se dispone de 6 símbolos OFDM tal como se muestra en la Figura 1.11 (b).

En la Tabla 1.9 se muestra la longitud del prefijo cíclico de acuerdo a su configuración, en donde el número de símbolo en una ranura de tiempo se representa como l . De acuerdo a la Figura 1.11 (a) el prefijo cíclico del primer símbolo OFDM se conforma de 160 muestras y cada prefijo cíclico de los siguientes 6 símbolos se conforman de 144 muestras. Al multiplicar el número de muestras por el tiempo de muestreo se obtiene la longitud del prefijo cíclico en micros segundos. La información de la Tabla 1.9 es válida para FDD y TDD [11].

Tabla 1.9. Longitud del prefijo cíclico [19]

	Separación entre subportadoras (Δf)		Longitud del prefijo cíclico
Enlace descendente	Prefijo cíclico normal	$\Delta f = 15kHz$	$160 \times T_s$ para $l = 0$ $144 \times T_s$ para $l = 1,2, \dots,6$
	Prefijo cíclico extendido	$\Delta f = 15kHz$	$512 \times T_s$ para $l = 0,1, \dots,5$
		$\Delta f = 7,5kHz$	$1024 \times T_s$ para $l = 0,1,2$
Enlace ascendente	Prefijo cíclico normal	$\Delta f = 15kHz$	$160 \times T_s$ para $l = 0$ $144 \times T_s$ para $l = 1,2, \dots,6$
	Prefijo cíclico extendido		$512 \times T_s$ para $l = 0,1, \dots,5$

h) **Resource Block (RB) y Resource Element (RE)**

Un RB o bloque de recursos en LTE se define como una unidad de 12 subportadoras consecutivas en frecuencia, ocupando un ancho de banda de 180 kHz con separación entre subportadoras de 15 kHz y con una duración de una ranura de tiempo [19].

Un RE o elemento de recursos en LTE es la unidad más pequeña de recursos de radio, corresponde a un símbolo OFDM o SC-FDMA en tiempo y a una subportadora en frecuencia. Cierta número de elementos de recursos son reservados para señales de sincronización, señales de referencia, señalización de control e información crítica del sistema de difusión, los elementos de recursos sobrantes se utilizan para la transmisión de datos [2][19].

La ranura de tiempo se presenta como una rejilla de recursos tanto para enlace descendente como ascendente. La rejilla de recursos representa los recursos en tiempo y frecuencia. En la Figura 1.12 (a) se muestra la rejilla de recursos para enlace descendente, donde se representa el número de símbolos OFDM por bloque de recursos (N_{Symbol}^{DL}), el

número de subportadoras por bloque de recursos (N_{SC}^{RB}) y el ancho de banda de transmisión (N_{RB}^{DL}).

Así mismo, la Figura 1.12 (b) muestra la rejilla de recursos para enlace ascendente, donde se indica el número de símbolos SC-FDMA por bloque de recursos (N_{Symb}^{UL}), el número de subportadoras por bloque de recursos (N_{SC}^{RB}) y el ancho de banda de transmisión (N_{RB}^{UL}) [21].

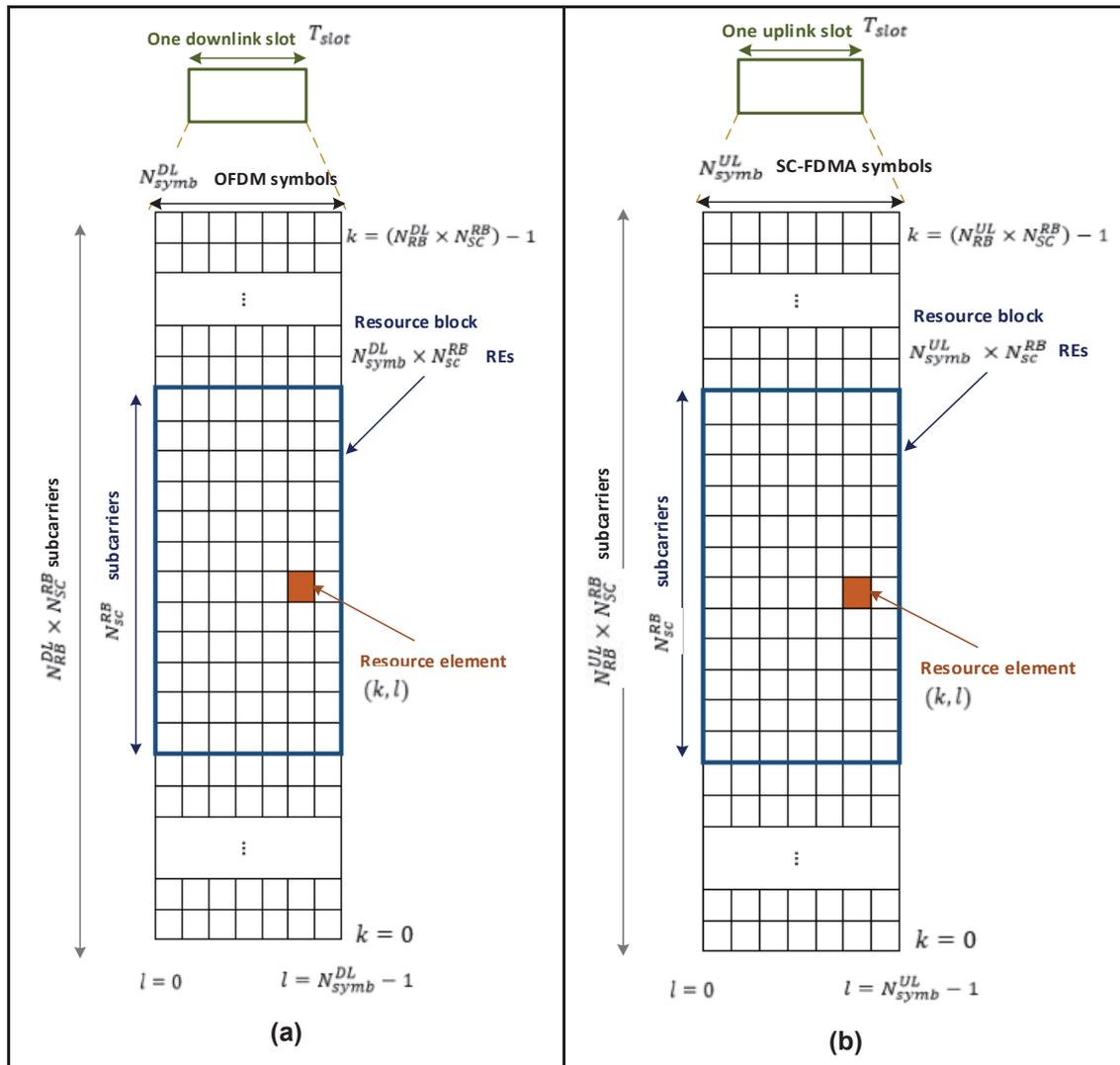


Figura 1.12. Rejilla de recursos en tiempo y frecuencia de (a) enlace descendente y (b) enlace ascendente [18]

El número de subportadoras por bloque de recursos (N_{SC}^{RB}), el número de símbolos por bloque de recursos en enlace descendente (N_{Symb}^{DL}) y en enlace ascendente (N_{Symb}^{UL}) varía en función de la longitud del prefijo cíclico y de la separación entre subportadoras, tal como se muestra en Tabla 1.10 [21].

Con respecto a los elementos de recursos, en la Figura 1.12 se observa que un RE se identifica por el par (k, l) , donde k representa el número de subportadora y l el número de símbolo OFDM o SC-FDMA [19].

Tabla 1.10. Parámetros de un RB en enlace descendente y ascendente [21]

	Separación entre subportadoras (Δf)		N_{SC}^{RB}	N_{Symb}^{UL}
Enlace descendente	Prefijo cíclico normal	$\Delta f = 15kHz$	12	7
	Prefijo cíclico extendido	$\Delta f = 15kHz$		6
		$\Delta f = 7,5kHz$	24	3
Enlace ascendente	Prefijo cíclico normal	$\Delta f = 15kHz$	12	7
	Prefijo cíclico extendido		12	6

i) Señales de referencia en la estructura de la trama

A las señales de referencia para enlace descendente y ascendente también se las conoce como: *Reference Signal Primary (RSP)* y *Reference Signal Secondary (RSS)* según [27].

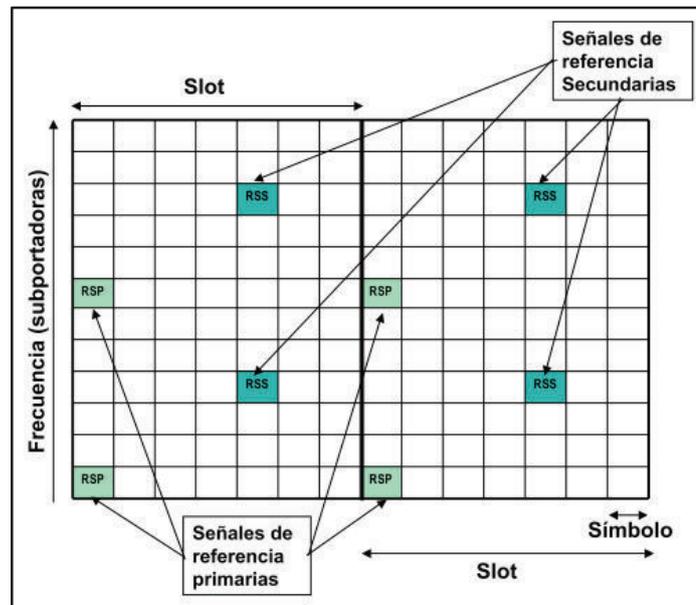


Figura 1.13. Señales de referencia en una subtrama [20]

Las señales de referencia se ubican en ciertos elementos de recursos cada 6 subportadoras en frecuencia, tal como se ilustra en la Figura 1.13. Con las señales de

referencia, el equipo de usuario realiza correcciones que permiten minimizar la probabilidad de errores de demodulación. En un RB son necesarias como mínimo dos señales de referencia, denominadas señal de referencia primaria (RSP) y secundaria (RSS). Las señales RSP se sitúan en el primer símbolo OFDM de la ranura de tiempo y de acuerdo a las condiciones del canal de radio se añaden las señales RSS que regularmente se ubican en el quinto símbolo OFDM de la ranura de tiempo [13][20].

j) Señales de sincronización en la estructura de la trama

Para FDD, la ubicación de las señales de sincronización *Primary Synchronization Signal* (PSS) y *Secondary Synchronization Signal* (SSS) en el tiempo se observa en la Figura 1.14.

La PSS siempre se localiza en el último símbolo OFDM de la ranura de tiempo 0 y 10 de la trama, lo que permite al equipo de usuario obtener información acerca del tiempo límite de la ranura de tiempo independientemente de la longitud del prefijo cíclico. La SSS se localiza en el símbolo OFDM anterior a la PSS [2].

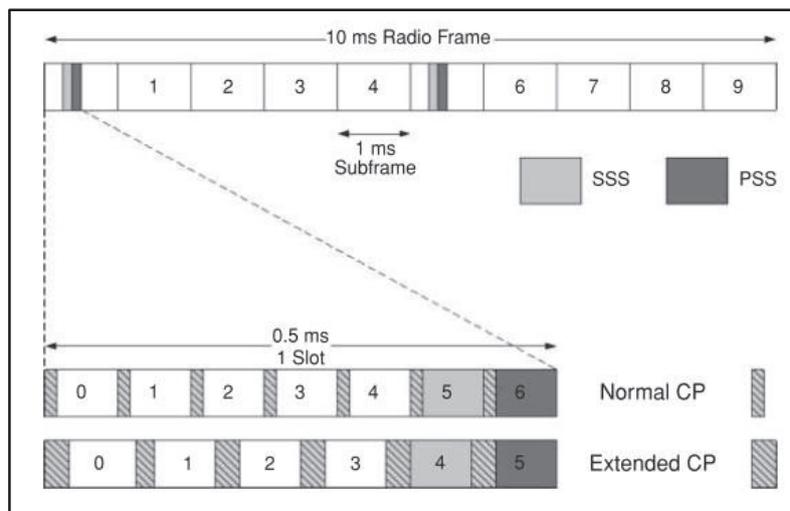


Figura 1.14. Señales de sincronización en FDD [2]

La PSS se transmite cada 5 ms, se utiliza para la sincronización en frecuencia y para transportar información del identificador de la celda. La secuencia *Zadoff-Chu* dispone de diferentes índices de raíz para distinguir la información del identificador de tres diferentes celdas [33].

En la Figura 1.15 se indica un ejemplo de la ubicación de las señales de referencia en enlace descendente para el tipo de duplexación TDD. La PSS se transmite en enlace descendente independientemente de la configuración de la trama. Se localiza en el tercer símbolo OFDM de las ranuras de tiempo 2 y 12 de la trama, de las configuraciones UL-DL

número 0, 1, 2 y 6. La localización de la SSS es tres símbolos OFDM anteriores al símbolo de la PSS. Para los dos tipos de duplexación la localización de la SSS varía según la configuración del prefijo cíclico [2][19].

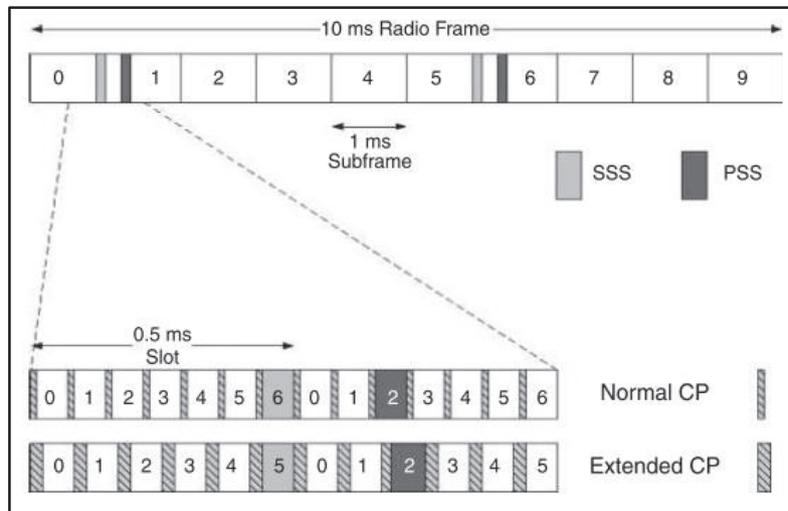


Figura 1.15. Señales de sincronización en la trama LTE TDD con periodicidad de punto de conmutación de 5 ms [2]

1.3.5. Diferencias entre LTE FDD y LTE TDD

La comparación entre LTE FDD y LTE TDD es un tema poco explorado. Sin embargo, aún se realizan investigaciones acerca de los beneficios y problemas que se generan al utilizar el uno o el otro tipo de duplexación en las redes LTE.

En [34] se realiza el cálculo teórico del *throughput* en LTE FDD y en LTE TDD, donde el autor define parámetros como: el ancho de banda total, número de bloques de recursos, esquema de modulación, sobrecarga de los mensajes de control y de señalización, entre otros. En [10] se realiza solamente la comparación teórica entre LTE FDD y LTE TDD, se enfoca en la transmisión en enlace descendente y ascendente. En [35] se estudia LTE FDD y LTE TDD en la banda 2,6 GHz, la cual se utiliza en Malasia.

Es importante tomar en cuenta que el presente estudio técnico basa su investigación en bibliografía relacionada al tema y además en simulaciones llevadas a cabo en el *Software* ICS Designer para un área de cobertura en Ecuador.

A pesar que en las secciones anteriores ya se ha discutido algunas diferencias a nivel físico entre LTE FDD y LTE TDD a continuación, en la Tabla 1.11 se identifican las principales diferencias que existen al utilizar los tipos de duplexación FDD y TDD en LTE.

Tabla 1.11. FDD vs TDD

FDD	TDD
Aplicaciones	
Adecuado para las comunicaciones de voz dado que el ancho de banda de enlace descendente y ascendente son diferentes y las transmisiones son simultáneas.	Adecuado para <i>web browsing</i> dado que se asigna diferentes ranuras de tiempo de la misma trama para enlace descendente y ascendente, la velocidad de datos en enlace descendente llega a ser mayor que en enlace ascendente.
Interferencia	
El uso de FDD es apropiado para redes de área amplia que no tienen regiones aisladas.	La red puede ser afectada considerablemente debido a la interferencia, por lo tanto, el modo TDD se recomienda en redes con <i>hot spots</i> lo suficientemente separados.
Uso de filtro	
Se utiliza el filtro dúplex para separar las transmisiones de enlace descendente y ascendente.	El UE y el eNodeB no usan filtro dúplex dado que las transmisiones en enlace descendente y ascendente no son simultáneas.
Coexistencia	
En una celda es posible utilizar el tipo de duplexación FDD o TDD. El equipo de usuario soporta <i>full duplex FDD</i> , <i>half duplex FDD</i> y TDD, pero solo uno a la vez.	
Asignación del espectro	
Al operar en bandas de frecuencia emparejadas, la asignación del espectro requiere de una banda de guarda lo suficientemente grande para separar las transmisiones en enlace descendente y ascendente, por lo tanto la eficiencia del espectro disminuye.	Al operar en bandas de frecuencia no emparejadas, la asignación del espectro es flexible y se puede lograr una mayor eficiencia espectral.
Asignación de recursos	
Los recursos en las bandas de frecuencia asignadas para la transmisión en enlace descendente y ascendente son predeterminados, por lo tanto, no soporta tráfico asimétrico.	Las ranuras de tiempo se asignan de forma flexible para transmitir en enlace descendente y ascendente, por lo tanto soporta el tráfico asimétrico.
Reciprocidad en enlace ascendente y enlace descendente	
Los canales son no correlacionados debido al uso de diferente frecuencia para transmitir en enlace descendente y ascendente	La reciprocidad de canal puede ser explotada mediante el uso de la tecnología <i>smart antenna</i> para incrementar el <i>throughput</i> de los usuarios en el borde de la celda.
Banda de guarda	
El uso de una banda de guarda en FDD para evitar la interferencia entre enlace descendente y ascendente conlleva al uso ineficiente de los recursos del espectro.	En TDD se usa una banda de guarda para evitar la colisión entre transmisiones en enlace descendente y ascendente, en consecuencia, se produce la reducción de la capacidad de la red.

2. METODOLOGÍA

La metodología del presente Trabajo de Titulación es de carácter experimental mediante la utilización del software ICS Designer. El objetivo principal es realizar un estudio comparativo del rendimiento entre las tecnologías LTE FDD y TDD, mediante la implementación y simulación de estas dos redes para obtener valores de RSRP, RSRQ, SNIR y *throughput*.

En el presente capítulo se describen las diferentes fases metodológicas utilizadas para cumplir con el objetivo principal del Trabajo de Titulación. En primera instancia se describen los parámetros de evaluación de la cobertura, los cuales son la base de la comparación entre ambas tecnologías.

En segunda instancia se describe el diseño de la red LTE FDD y LTE TDD, donde se detalla el área de cobertura, los archivos de cartografía, la ubicación de las estaciones base sobre la zona de trabajo y los parámetros del eNodeB y UE. Cabe mencionar que, la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) ha supervisado el uso correcto de los archivos de cartografía en el software ICS Designer, con el fin de que su uso sea con fines de investigación académica.

Posteriormente, se realiza una breve descripción del modelo de propagación y geometría de difracción. La información mencionada sirve de apoyo para el diseño de las redes LTE en el software ICS Designer. Finalmente, se señalan las configuraciones realizadas en las herramientas de simulación disponibles en el software ICS Designer.

2.1. Parámetros de evaluación

LTE utiliza diferentes parámetros que permiten evaluar su rendimiento y cobertura tal que con su análisis pueda mejorar la movilidad, a continuación se describen dichos parámetros.

2.1.1. Reference Signal Received Power (RSRP)

RSRP se define como el promedio lineal de las contribuciones de potencia medida en vatios (W) de los elementos de recursos que transportan señales de referencia específicas de la celda dentro del ancho de banda de medición. La medida de este parámetro se utiliza para los procedimientos de reelección de celda y *handover*, además, para calcular este parámetro es necesario que el equipo de usuario se encuentre sincronizado con la celda objetivo mediante la información adquirida de las señales de sincronización PSS y SSS [20][36].

2.1.2. Reference Signal Received Quality (RSRQ)

RSRQ proporciona una medida de la calidad de la señal de referencia específica de la celda, se utiliza como información adicional para la decisión de *handover* y reelección de celda. Adicionalmente, a RSRQ se lo identifica como la relación señal a ruido más interferencia medida por el equipo de usuario para una específica celda objetivo [20].

La definición de RSRQ se indica en la ecuación (2.1), donde *RSRP* es la *Reference Signal Received Power*, *N* es el número de RBs en el ancho de banda de medición de *RSSI*. *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* representa el promedio lineal de la potencia total recibida en vatios (W) de los símbolos OFDM que contienen símbolos de referencia en el ancho de banda de medición, además, incluye la interferencia de canal adyacente, el ruido térmico, entre otros [36].

$$RSRQ = \frac{N \times RSRP}{RSSI}$$

Ecuación 2.1. Definición de RSRQ

2.1.3. Signal to Noise plus Interference Ratio (SNIR)

Este parámetro se define como la relación entre el nivel de potencia de la señal y la suma de los niveles de potencia promedio de las señales interferentes de las celdas vecinas y el ruido. SNIR se calcula en cada RB por el equipo de usuario. Se convierte en el indicador *Channel Quality Indicator (CQI)*, posteriormente el eNodeB lo utiliza para seleccionar el *Modulation Coding Scheme (MCS)* adecuado para la transmisión de datos de usuario en un RB específico. Con el MCS se conoce el número de bits por símbolo a enviar, el *throughput* que puede alcanzar un determinado RB y el número de RBs asignados al usuario por parte del eNodeB [37].

En la Tabla 2.1 se presentan los valores de umbral de los parámetros RSRP, RSRQ y SNIR [38].

Tabla 2.1. Valor de umbrales de RSRP, RSRQ y SNIR

Nivel de señal	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNIR (dB)
Excelente	≥ -80	≥ -10	≥ 20
Bueno	-80 a -90	-10 a -15	13 a 20
Aceptable	-90 a -100	-15 a -20	0 a 13
Malo	≤ -100	≤ -20	≤ 0

Av. Atahualpa, Bayas, Azuay, Irlanda, Holanda, El Batán y Av. 6 de Diciembre; al este con las vías Manuel Guzmán y Av. Eloy Alfaro, Carlos J. Arosemena Tola y Av. Eloy Alfaro, Juan de Dios, Eduardo Salazar, El Batán y Av. Eloy Alfaro; y, al oeste con las vías Hidalgo Pinto y Mariano Echeverría, Los Comicios y Los Cabildos, Andrade de Sancho y Granda Centeno, Gaspar de Escalona y Juan José Villalengua, Vasco de Contreras y Pedregal, Pedregal y Rumipamba.

2.2.2. Archivos de cartografía

Previo a la definición del área de cobertura en el software ICS Designer hay que aclarar que, este software trabaja en capas mediante archivos de cartografía. Adicionalmente, los mapas de diferentes países se encuentran disponibles en [39].

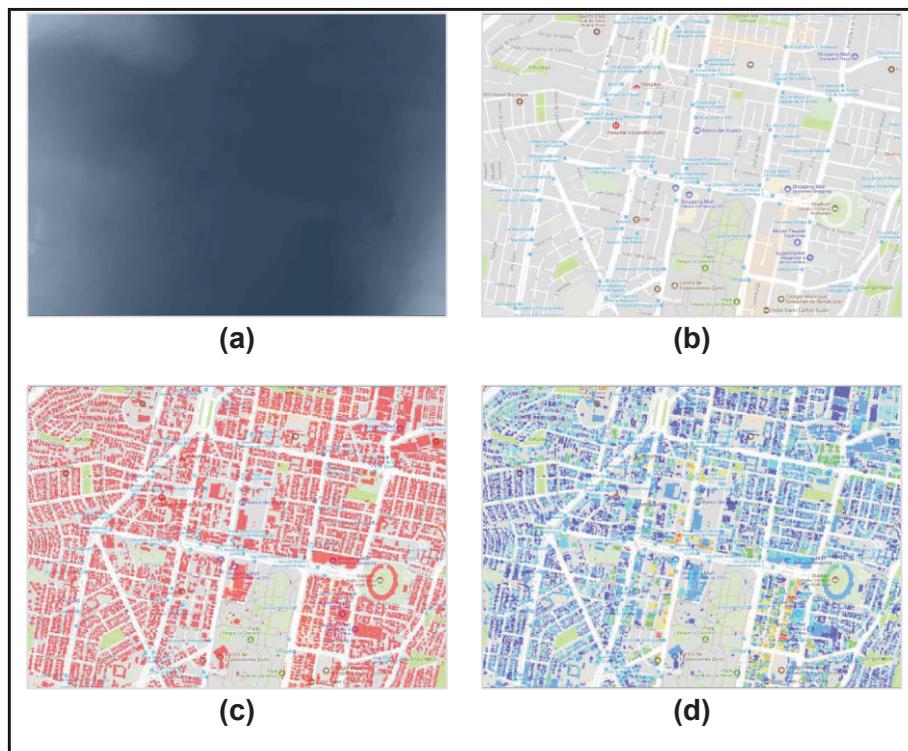


Figura 2.2. Archivos cartográficos: (a) DMT, (b) *Image*, (c) *Clutter* y (d) *Building*

Las capas de cartografía que requiere el software son: *Digital Terrain Model* (DMT), *image*, *clutter* y *building*. La capa modelo digital de terreno o DMT muestra el relieve de la zona de trabajo y cada pixel describe la altitud del terreno sobre el nivel del mar. La capa *image* (imagen) contiene información del mapa físico, permite visualizar las zonas del mapa. La capa de ocupación de suelo o *clutter* describe la naturaleza del ambiente (aspectos morfológicos), abarca información relacionada con la altura y atenuación de las diferentes zonas que conforman el mapa. Por último, la capa *building* (edificios) contiene información

sobre la altura de los edificios del área de cobertura [40], en la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de estas capas.

Para llevar a cabo el diseño y análisis de las redes LTE en el software ICS Designer se requiere de un mapa de alta resolución. Se utilizó un mapa de Quito con una resolución de 5 m, el cual dispone de los archivos cartográficos DMT, *image*, *clutter* y *building*. Estos archivos fueron proporcionados por la ARCOTEL para el desarrollo de esta investigación.

Del mapa de la ciudad de Quito se extrae el área de cobertura a utilizar en el software ICS Designer y el procedimiento a seguir se detalla en el ANEXO III.

2.2.3. Ubicación de las estaciones base

Se utiliza la ubicación de las estaciones bases ya existentes en la zona de trabajo, con el propósito de implementar un ambiente más real en el software ICS Designer. Para tal efecto, la ubicación de las estaciones bases se toman de [30].

Las estaciones base se añaden en el mapa según las coordenadas geográficas de la Tabla 2.2. Cada estación base utiliza sectorización hexagonal lo que permite ubicar antenas directivas en cada sector. La ubicación de las antenas en la estación base depende de la altura del edificio, edificios de gran altura poseen antenas sectoriales ubicadas de forma estratégica para brindar cobertura y evitar la obstrucción del mismo edificio en la propagación de las ondas de radio. En el ANEXO III se encuentran los pasos a seguir para agregar las estaciones bases al mapa en el software ICS Designer.

Tabla 2.2. Coordenadas geográficas de las estaciones base

#	Nombre de la estación base	Latitud	Longitud
1	AMAZONAS	-0,17271	-78,4847
2	ESTADIO	-0,17603	-78,47722
3	VIVALDI	-0,17801	-78,48623
4	NACIONES UNIDAS	-0,17375	-78,48831
5	REPUBLICA_COUB	-0,17711	-78,49154
6	SHYRIS	-0,17014	-78,47914

En la Figura 2.3 se observa la ubicación de las estaciones base en el área de cobertura seleccionada en el mapa de Quito. Se aprecian las 6 estaciones base con 3 sectores cada una.

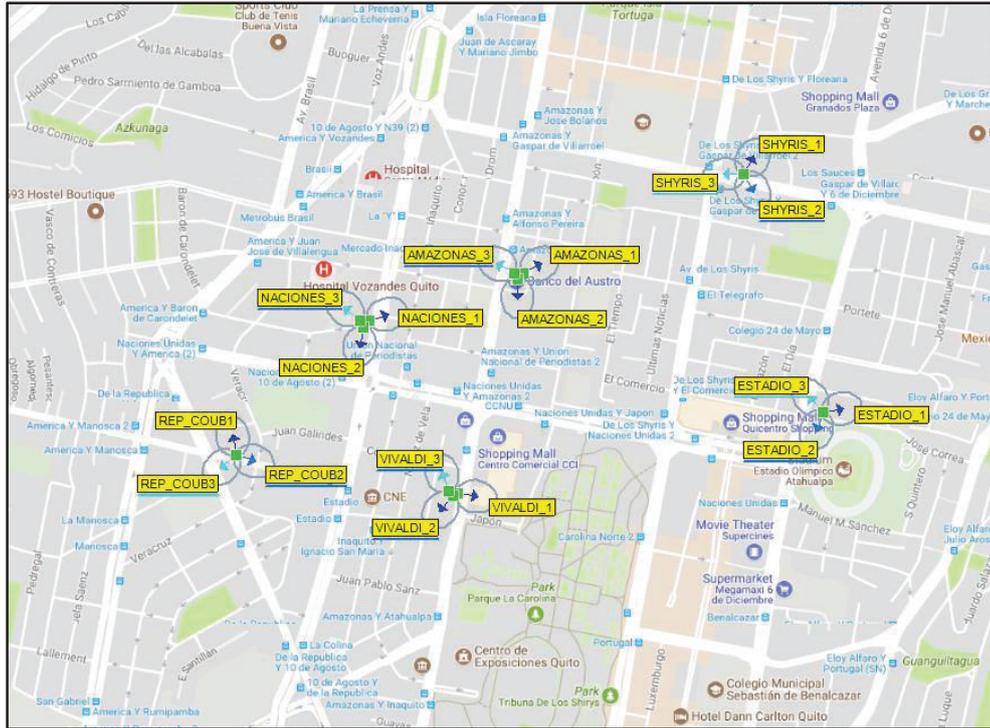


Figura 2.3. Estaciones base ubicadas en el mapa de Quito

2.2.4. Parámetros del eNodeB

Los parámetros necesarios para la configuración de las estaciones base (eNodeB) se dan a conocer en esta subsección. Se selecciona el modo de duplexación, la técnica de modulación, se configura el esquema MIMO, la banda de operación, entre otros parámetros.

La estación base se constituye de varios elementos como antenas y equipos de radiofrecuencia. La Unidad de Radio Remota (RRU) es el equipo de radiofrecuencia que permite la operación simultánea de diferentes tecnologías de comunicación celular. Generalmente, la potencia de salida máxima de una RRU depende de las características del equipo y suelen ser de 20, 40, 60, 80 o 100 W, y la potencia se reparte entre el número de portadoras que permite el equipo [41].

Tabla 2.3. Características fundamentales de la RRU 3971

Parámetro	Valor
Banda de frecuencia	AWS
Rango de frecuencias para recepción	1710 MHz - 1755 MHz
Rango de frecuencias para transmisión	2110 MHz - 2155 MHz
Ancho de banda	5, 10, 15 o 20 MHz
Capacidad	2 portadoras
Potencia de salida	40 W

El valor típico de la potencia máxima de transmisión de una portadora para el ambiente urbano de la ciudad de Quito es de 20 W, este valor se basa en la información proporcionada por la ARCOTEL. En la Tabla 2.3 se presentan las características fundamentales de la RRU modelo 3971 del fabricante Huawei [42] y en el ANEXO I se localiza la hoja de datos de este equipo.

La antena permite orientar el sentido de propagación de la energía electromagnética que se genera en los transmisores, así mismo, capta la energía que existe en el espacio libre [43]. El modelo de antena 824-960/2x1710-2170 MHz de la marca POWERWAVE se selecciona como antena del eNodeB debido a que opera dentro del rango de frecuencias a utilizar en las redes LTE, también se caracteriza por ser una antena sectorial. En la Tabla 2.4 se señalan las especificaciones eléctricas de la antena [44], su diagrama de radiación se presenta en la Figura 2.4 y su hoja de datos se encuentra en el ANEXO II.

Tabla 2.4. Especificaciones eléctricas de la antena 824-960/2x1710-2170 MHz

Especificaciones eléctricas	Recepción	Transmisión
Rango de frecuencias	1710 – 1880 MHz	1900 – 2170 MHz
Polarización	Lineal dual, $\pm 45^\circ$	
<i>Voltage Standing Wave Ratio</i> (VSWR)	1,5:1	
Ganancia	14,4 dBi	14,8 dBi
Ancho del haz en el plano H	$65^\circ \pm 5^\circ$	$62^\circ \pm 5^\circ$
Ancho del haz en el plano E	$14^\circ \pm 1^\circ$	$13^\circ \pm 1^\circ$
Relación frente-atrás	>30 dB	
<i>Downtilt</i> eléctrico	$0^\circ - 12^\circ$	
Impedancia de entrada	50 Ω	
Polarización	Vertical/Horizontal	

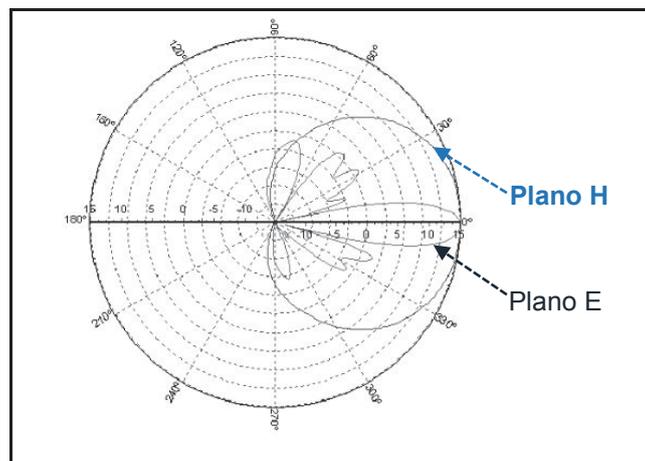


Figura 2.4. Diagrama de radiación de la antena 824-960/2x1710-2170 MHz [44]

El equipo de usuario es un dispositivo móvil, por lo tanto, las condiciones del canal son variables por lo que el eNodeB deberá ajustar el tipo de modulación y tasa de codificación según las condiciones del canal [45]. Por ello, se elige la modulación adaptativa.

La banda AWS (1700/2100 MHz), asignada por el Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL) en Ecuador, se selecciona para la implementación de las redes LTE en el software ICS Designer. El rango de frecuencias para enlace ascendente varía desde 1710 MHz hasta 1755 MHz y en enlace descendente varía desde 2100 MHz hasta 2155 MHz. Se escoge la frecuencia de portadora de 2110 MHz.

La figura de ruido (NF, *Noise Figure*) tiene un valor de 5 dB en el eNodeB y 9 dB en el equipo de usuario de acuerdo a [46]. Este parámetro hace referencia a la degradación del SNIR a causa de los componentes de radiofrecuencia del receptor [2].

En la Tabla 2.5 se indican los parámetros a configurar en cada eNodeB de las redes LTE, estos parámetros se han tomado de [46][47]

Tabla 2.5. Parámetros del eNodeB.

Parámetros	eNodeB	
	LTE FDD	LTE TDD
Tecnología	LTE FDD	LTE TDD
Modulación	Adaptativa	
Potencia máxima de transmisión	20 W	
Altura de la antena	25 m – 30 m	
Pérdidas por cables	2 dB	
Pérdidas adicionales	1 dB	
MIMO	SU-MIMO SD 2x2	
Prefijo cíclico	Normal	
Banda de operación	1700/2100 MHz	
Ancho de banda del canal	20 MHz	
Número total de RBs	100	
Frecuencia de portadora	2110 MHz	
Figura de ruido	5 dB	
Configuración <i>DL-to-UL</i>		0,1,2,3,4,5,6
Configuración de la subtrama especial		4

Además, las 7 configuraciones diferentes de *DL-to-UL* de la trama tipo 2 se seleccionan para el análisis del rendimiento de la red. Se elige la configuración de subtrama especial número 4 de la trama tipo 2, y se asigna 2 símbolos al canal PDCCH tanto en la red LTE FDD y LTE TDD según la recomendación dada en [22].

El prefijo cíclico normal genera menos sobrecarga en el símbolo OFDM en comparación con el prefijo cíclico extendido, también se lo utiliza en celdas de área urbana en contraste con el prefijo cíclico extendido que se prefiere en áreas rurales [3][48]. Por ello, se elige la configuración de prefijo cíclico normal para cada eNodeB.

A continuación, se mencionan las configuraciones realizadas en el software ICS Designer para el diseño de las redes LTE. Para obtener más detalles acerca de estas configuraciones es necesario revisar el ANEXO III.

Cabe mencionar que, en este capítulo se muestran las configuraciones que corresponden a la red LTE FDD y la red LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 1 de la trama tipo 2, considerando que el resto de las configuraciones *DL-to-UL* de LTE TDD son semejantes.

En la Figura 2.5 se indican los parámetros configurados para ambas redes LTE, para lo cual se utiliza los datos presentados en la Tabla 2.5. El software calcula el valor de potencia nominal según el porcentaje de la potencia máxima de transmisión dedicada a los canales y señales. Además, se utiliza una configuración de antena SU-MIMO SD 2x2, de modo que la ganancia de la antena de transmisión refleja un aumento de 3 dB.

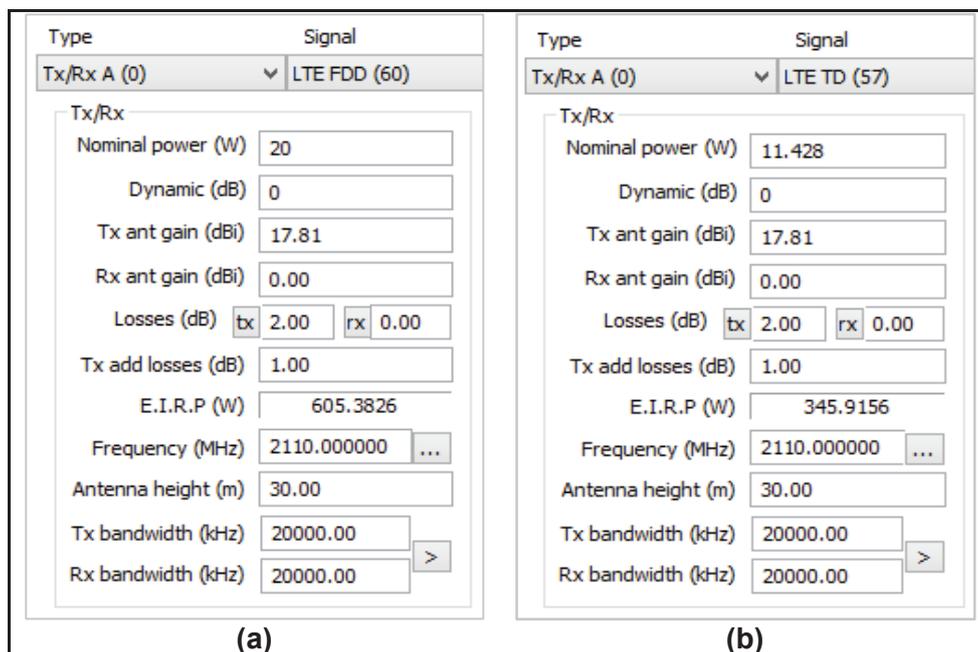


Figura 2.5. Configuración de los parámetros generales: (a) LTE FDD y (b) LTE TDD

Adicionalmente, el software calcula el valor del parámetro *Equivalent Isotropically Radiated Power* (EIRP) que se define como la potencia equivalente de transmisión que una antena isotrópica debería emitir para alcanzar la misma densidad de potencia que otra antena.

En la Figura 2.6 se observa la asignación automática del número total de *RB*, número total de subportadoras y la separación entre subportadoras según el ancho de banda de transmisión configurado en el software.

Total number of Resource Blocks:

Total number of Sub-carriers:

Subcarrier Spacing:

Figura 2.6. Número de RBs, subportadoras y separación entre subportadoras

La Figura 2.7 representa un resumen del porcentaje de la potencia máxima de transmisión dedicado a la potencia nominal de transmisión para cada portadora, así mismo, muestra el valor de EIRP según el tipo de duplexación.

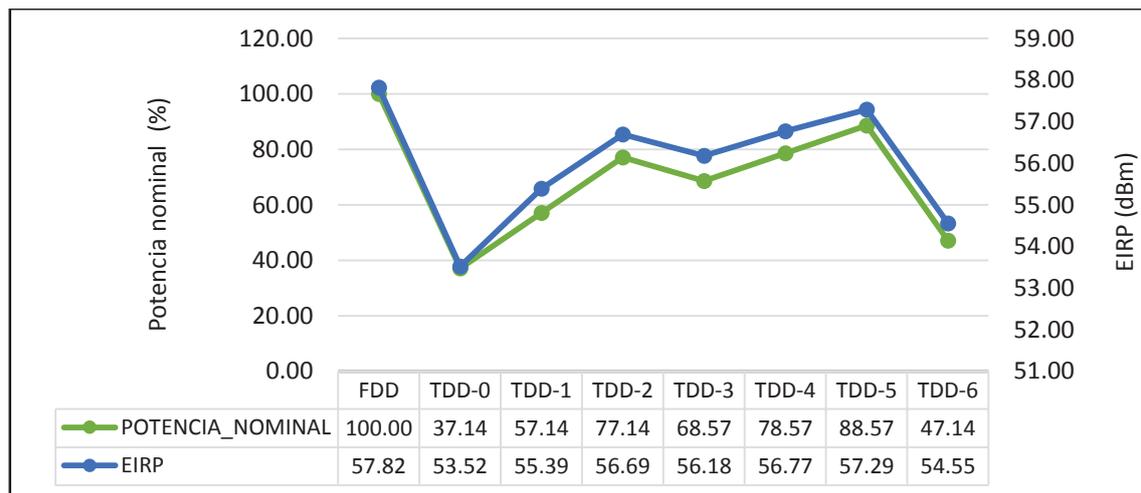


Figura 2.7. Valor de potencia nominal y de EIRP

La configuración de los parámetros de la antena de transmisión se presenta a continuación. En el ANEXO III se detallan las opciones utilizadas para realizar las configuraciones correspondientes a los parámetros de radiación de la antena.

Los parámetros de radiación de la antena de transmisión se configuran de manera similar para cada sector de la estación base, ya sea en la red LTE FDD o LTE TDD. El patrón de radiación en el plano E y plano H se obtiene de la base de datos de POWERWAVE del software.

En la Figura 2.8 se muestra la configuración de los parámetros de radiación de la antena en el software ICS Designer, donde se observan los patrones de radiación de la antena en el plano H y plano E, el valor de azimut y *tilt*, el tipo de polarización de la antena y la

configuración del esquema SU-MIMO SD 2x2. Los valores de azimut y *tilt* varían para cada sector de la estación base con el fin de obtener mejor cobertura y disminuir la interferencia. El esquema SU-MIMO SD utiliza diversidad espacial para mejorar la calidad de la señal recibida por el usuario.

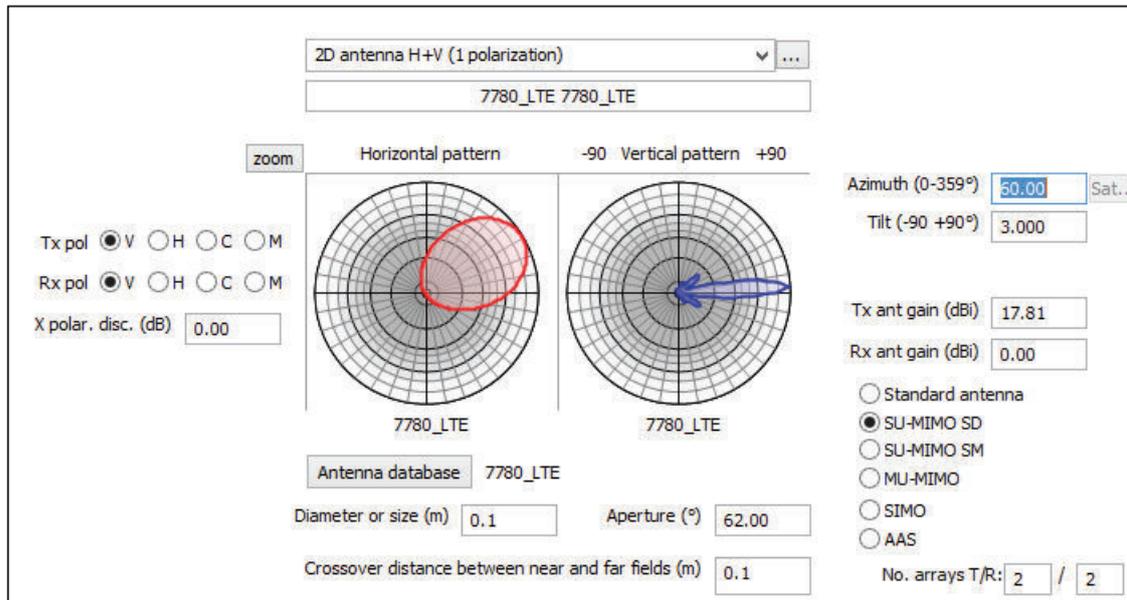


Figura 2.8. Configuración de los parámetros de radiación de la antena transmisora

Por otra parte, se presentan las configuraciones realizadas en el software con respecto a la asignación de potencia a los canales y señales. En el ANEXO III se describen las herramientas utilizadas para realizar las configuraciones mencionadas.

La potencia máxima de transmisión se comparte entre las señales de sincronización, señal de referencia, canales de control y canal de tráfico. En la Figura 2.9 se presenta la primera parte de la configuración de potencia de cada sector del eNodeB. Se selecciona el modo de duplexación (FDD o TDD) y se escoge la configuración de prefijo cíclico normal. Se ingresa el número de arreglos de antenas para la configuración del esquema SU-MIMO SD 2x2, se especifica 2 símbolos OFDM para el canal PDCCH y la configuración de la trama para el modo de duplexación TDD.

El software realiza la distribución de potencia tal como se presenta en la Figura 2.10. El *overhead* del sistema se produce por la cantidad de recursos que ocupan los canales de control, señales de referencia y señales de sincronización para realizar sus funciones.

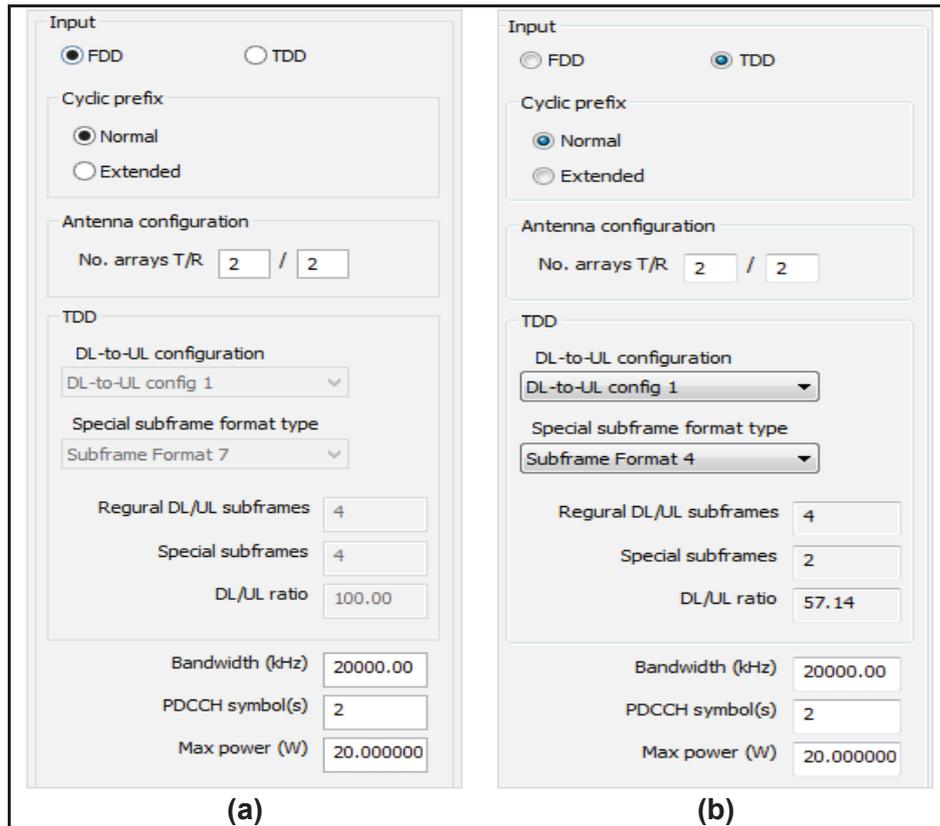


Figura 2.9. Configuración de potencia: (a) LTE FDD y (b) LTE TDD (Parte 1)

Traffic parameters		Traffic parameters	
% Ref. Signal	9.524	% Ref. Signal	9.524
% PDSCH	78.243	% PDSCH	34.691
% PDCCH	11.905	% PDCCH	12.501
% PBCH	0.157	% PBCH	0.275
% PSS	0.086	% PSS	0.000
% SSS	0.086	% SSS	0.150
Total %	100.000	Total %	57.140
Power max W	20.00000	Power max W	20.00000
Nominal power W	20.00000	Nominal power W	11.42800

Figura 2.10. Configuración de potencia: (a) LTE FDD y (b) LTE TDD (Parte 2)

2.2.5. Parámetros del equipo de usuario

Los parámetros del equipo de usuario se presentan en la Tabla 2.6, se asume un valor de ganancia de 0 dBi para la antena de recepción según [22] y la altura de la antena de recepción es de 1,5 m según [4].

Tabla 2.6. Parámetros de referencia del UE.

Parámetros	UE
Altura de la antena	1,5 m
Ganancia de la antena (asumida)	0 dBi
MIMO	2Tx-2Rx
Figura de ruido	9 dB

Cabe señalar que, los parámetros del equipo de usuario se configuran en las herramientas de simulación utilizadas, las cuales se mencionan en las secciones posteriores.

2.3. Modelos de propagación y geometría de difracción

Los modelos de propagación permiten el cálculo de las pérdidas por propagación del canal inalámbrico. Entre el transmisor y el receptor se encuentran obstáculos que afectan la trayectoria de propagación de la señal, además, la variación del perfil del terreno influye en estas pérdidas [49].

Para la simulación de las redes se debe seleccionar el modelo de propagación que se adapte a las características del tipo de terreno y el tipo de red. Es así que, el software ICS Designer dispone de diferentes modelos de propagación, en la Tabla 2.7 se exponen las características principales de los modelos de propagación que se consideran adecuados al entorno del área de cobertura seleccionada (área urbana, características del terreno, altura de las antenas, etc.) [47][50][51].

Tabla 2.7. Modelos de propagación disponibles en el software ICS Designer

Modelo de propagación	Rango de frecuencias	Altura de la antena del eNodeB	Altura de la antena del UE	Rango de distancia entre Tx y Rx
Okumura - Hata	150 MHz a 1500 MHz	30 m a 200 m	1 m a 10 m	1 km a 20 km
Cost 231-Hata	1500 MHz a 2000 MHz	30 m a 200 m	1 m a 10 m	1 km a 20 km
Hata Extendido	2000 MHz a 3000 MHz	30 m a 200 m	1 m a 10 m	1 km a 100 km
3GPP LTE Urban	800 MHz a 2000 MHz	4 m a 50 m	1 m a 3 m	30 m a 6 km

El software ICS Designer realiza el cálculo de las pérdidas totales por propagación ($L_{propagación}$) mediante la ecuación (2.2).

$$L_{propagación} = L_{fsd} + L_d + L_{clutter} + L_{modelo_prop}$$

Ecuación 2.2. Cálculo de las pérdidas totales por propagación [51]

Donde:

- L_d : Pérdida por difracción (dB)
- L_{fsd} : Pérdida por espacio libre (dB)
- $L_{clutter}$: Atenuación por obstáculos topográficos (dB)
- L_{modelo_prop} : Pérdida según el modelo de propagación seleccionado (dB)

Los modelos de propagación Okumura-Hata, Cost 231-Hata y Hata Extendido presentan características similares, dado que se basan en el modelo de Okumura, el modelo de propagación Hata Extendido se adapta al rango de frecuencias en que deben operar las redes LTE a ser implementadas en el software ICS Designer. Por ello, se elige el modelo de propagación Hata Extendido.

2.3.1. Modelo Hata Extendido

El modelo Hata Extendido aumenta su rango de frecuencias con respecto a los modelos Okumura-Hata y Cost 231-Hata, es así que opera en un rango de frecuencias de hasta 3 GHz. Se aplica para los servicios móviles en ambiente sin línea de vista (non-LOS, *non Line of Sight*) o en ambientes que cuenten con información de las características de ocupación del terreno (edificios, casas, etc.) [52].

Para un ambiente urbano, el cálculo de las pérdidas por propagación (L_{modelo_prop}) entre el transmisor y receptor se obtiene con la ecuación (2.3) [50].

$$L_{modelo_prop} = A + (44,9 - 6,55 \log(h_{eff})) \times \log(dist) - a(h_{mobile})$$

Ecuación 2.3. Cálculo de las pérdidas por propagación con el modelo Hata extendido

Donde se consideran los siguientes parámetros [50]:

- A : Pérdida a 1 km de distancia (dB)
- h_{eff} : Altura efectiva de la antena transmisora (m). El valor de este parámetro se encuentra en el rango de 30 m a 200 m, si la altura efectiva de la antena es menor a 30 m se asume un valor de 30 m, si la altura efectiva de la antena es mayor a 200 m se asume un valor de 200 m.
- $dist$: Distancia entre el transmisor y el receptor (km). El valor de este parámetro se encuentra entre 1 km y 100 km.
- $a(h_{mobile})$: Factor de corrección en caso de que la altura de la antena receptora (h_{mobile}) sea mayor a 1,5 m.

El modelo Hata Extendido realiza el cálculo del parámetro A a través de la ecuación (2.4) y con la ecuación (2.5) se realiza el cálculo del parámetro $a(h_{mobile})$ [50].

$$A = \begin{cases} 69,55 + 26,26 \log(f) - 13,82 \log(h_{eff}) - a(h_{mobile}), & 150 \text{ MHz} \leq f < 1500 \text{ MHz} \\ 46,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_{eff}) - a(h_{mobile}), & 1500 \text{ MHz} \leq f < 2000 \text{ MHz} \\ 46,3 + 33,9 \log(2000) + 10 \log\left(\frac{f}{2000}\right) - 13,82 \log(h_{eff}) - a(h_{mobile}), & 2000 \text{ MHz} \leq f \leq 3000 \text{ MHz} \end{cases}$$

Ecuación 2.4. Cálculo del parámetro A

$$a(h_{mobile}) = (1,1 \log(f) - 0,7)h_{mobile} - (1,56 \log(f) - 0,8)$$

Ecuación 2.5. Cálculo del parámetro $a(h_{mobile})$

Donde se consideran los siguientes parámetros para el cálculo de A y de $a(h_{mobile})$ [50]:

- f : Frecuencia de la portadora (MHz)
- h_{mobile} : Altura de la antena receptora (m), el valor de este parámetro se encuentra en el rango de 1 m a 10 m.

2.3.2. Geometría de difracción

Los obstáculos que aparecen en la trayectoria de propagación de la onda de radio producen pérdidas por difracción [49]. Estas pérdidas se pueden determinar utilizando modelos de geometría de difracción.

Las pérdidas por difracción son calculadas por el software a través de modelos de difracción, el modelo de difracción *Deygout 1994* se elige según recomendación dada en [47].

Método Deygout 94

El método Deygout permite primero calcular el efecto de difracción (cálculo de las pérdidas) debido al obstáculo principal (MO) cuando existe más de un obstáculo, entre el transmisor (eNodeB) y receptor (UE), como se observa en la Figura 2.11. Posteriormente, se definen dos nuevas subtrayectorias, una subtrayectoria entre el eNodeB y el MO y la otra subtrayectoria entre el MO y el UE. Se identifica un obstáculo secundario (left MO) entre el transmisor y el obstáculo principal, otro obstáculo se identifica entre el obstáculo principal y el receptor (right MO), a continuación se calcula las pérdidas por difracción ocasionadas en cada subtrayectoria. La pérdida total por difracción se define como la suma de la pérdida por difracción ocasionada por el obstáculo principal más las pérdidas ocasionadas por el resto de obstáculos [50].

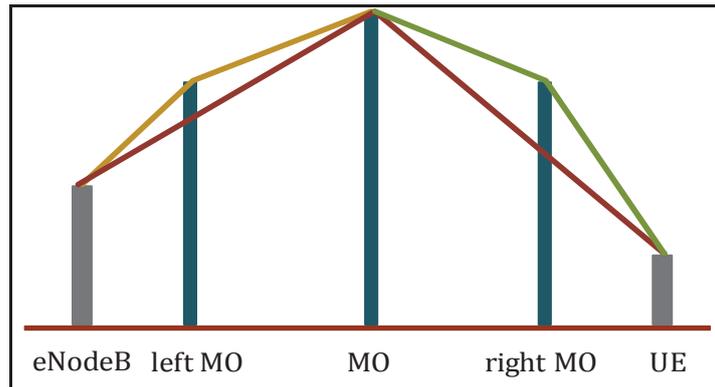


Figura 2.11. Método Deygout 94 para la difracción [50]

2.3.3. Modelo de propagación y geometría de difracción en ICS Designer

En la Figura 2.12 se observa la lista de los modelos de propagación y de geometría de difracción permitidos en el software ICS Designer, se observa además las opciones seleccionadas (modelo de propagación Hata Extendido y método de difracción Deygout 94).

En el ANEXO III se encontrarán mayores detalles sobre como configurar los modelos de propagación y geometría de difracción en el software ICS Designer.

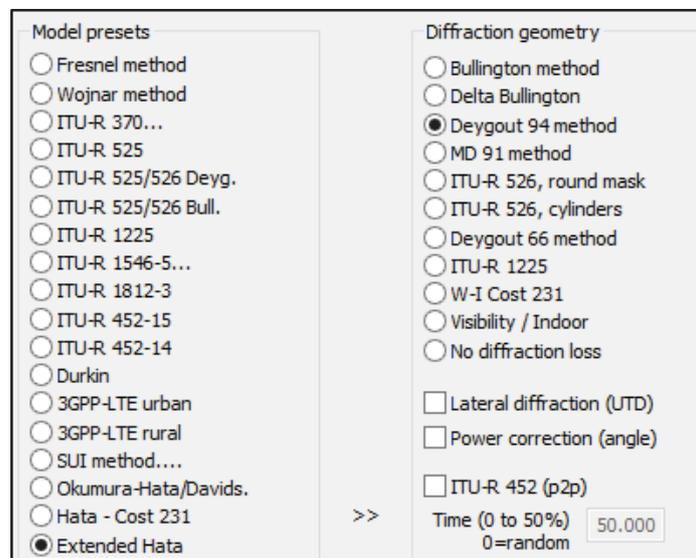


Figura 2.12. Selección del modelo de propagación y del método de difracción

2.3.4. Parámetros de clutter

Para decidir valores de atenuación por clutter se realizaron pruebas exhaustivas para determinar aquellos valores que se acercan a una red real. En el ANEXO III se detalla la configuración de estos parámetros de clutter.

Clutter code	Name	Attenuation (dB)	Clutter height	Reflection: Rho (0-1)	Erlang/km2	Surface factor	Diffraction factor	Station/km2	Stddev (dB)	Tip...	
0	Abrir	0.0	5.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
1	villas	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
2	Suburbano	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
3	urban	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
4	dense urban	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
5	Forestal	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	0.60	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
6	Hidroeléctrico	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	0.000	1.00	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
7	high urban	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
8	parque/bosque	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	0.40	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
9*	roof - building	200.0	3.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
10	rail	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
11	road	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
12	airport	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	
13	port	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	
14	open rural	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	
15	mine	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	
16	indoor 1	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	
17	indoor 2	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	
18	indoor 3	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	
19*	Frontera*	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	

dB/km all 0

CCIR UER Flat+absorption Flat+diffraction User Tuning None TSB-88

Indoor Sum applied (Absorption+diffraction)

Height factor: Indoor building add. atten.: dB Reference frequency: MHz

Path/Sub/Rx cov (R): T/R over clutter T/R over ground spot Rx over ground relaxed

Tx/Jam/MW (T): T/R over clutter T/R over ground

Do not calculate diffraction if clutter code= -1 = none

Figura 2.13. Configuración de los parámetros de *clutter*

En la Figura 2.13 se presentan los valores configurados en los parámetros de *clutter*. Cabe recalcar que, el mapa digital utilizado en el software ICS Designer presenta las características de terreno para los códigos de *clutter* 0 (open) y 9 (*roof-building*), es decir que el archivo *clutter* contiene zonas abiertas como las calles e información de la altura de los edificios del entorno urbano seleccionado como área de trabajo.

Además, se consideran las atenuaciones por absorción y difracción, al igual que un valor adicional de atenuación debido a las pérdidas ocasionadas en un ambiente *indoor*. También se considera la altura del transmisor y receptor a nivel del suelo.

2.4. Herramientas de simulación

En esta sección se presentan las herramientas de simulación utilizadas en el software ICS Designer. Primero se menciona la herramienta *Tx/Rx Field Strength* que permite el análisis del parámetro RSRP mediante mapas de cobertura. Posteriormente, se indica la herramienta de simulación *SNIR Maps* que posibilita el análisis del parámetro SNIR mediante mapas de cobertura. Adicionalmente, se muestra la herramienta de simulación *Throughput mapping* para el análisis del parámetro *throughput*. Por último, la herramienta de simulación *RSRQ maps* presenta los valores de RSRQ mediante mapas de cobertura.

En el ANEXO III se detallan las configuraciones realizadas en cada una de estas herramientas de simulación.

2.4.1. Tx/Rx Field Strength (FS)

En el software ICS Designer, la herramienta *Tx/Rx FS* permite analizar la cobertura del parámetro RSRP en enlace descendente según las configuraciones realizadas en los eNodeBs. También se configuran los parámetros de cobertura que se observan en la Figura 2.14 (a), donde la altura de la antena del receptor es de 1,5 m y la distancia de cálculo entre el transmisor y receptor es de hasta 10 km.

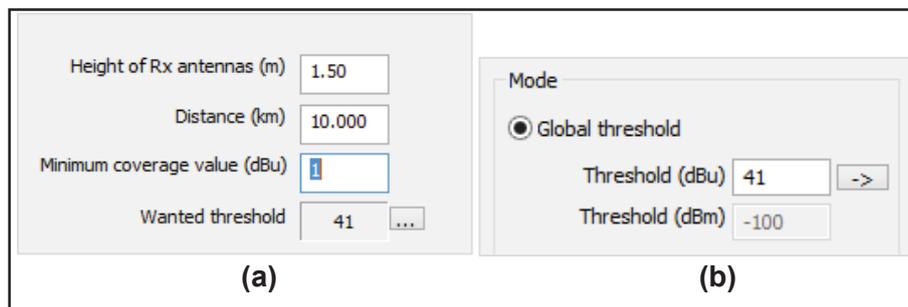


Figura 2.14. Parámetros de cobertura

Posteriormente, se selecciona el valor de cobertura mínimo como se observa en la Figura 2.14 (b), donde se define el valor de umbral de RSRP de 41 dBuV/m (-100 dBm) como valor mínimo de intensidad de campo a tomar en cuenta durante las simulaciones.

2.4.2. SNIR maps

En la Figura 2.15 se visualiza la configuración de la herramienta *SNIR maps*. El análisis de interferencia se realiza por medio de la opción *SNIR (PDSCH)*. Se configura el esquema MIMO del equipo de usuario, el valor de KTBf del equipo de usuario, entre otros factores.

Entre los parámetros a configurar en el software se tiene la *Inter Cell Interference Coordination (ICIC)* y el *Interference Rejection Factor (IRF)*. La interferencia intercelular o ICIC afecta las transmisiones desde o hacia el usuario de diferentes celdas servidoras. Esta interferencia se halla cuando el mismo RB es asignado en la misma subtrama en diferente celda, lo cual genera un nivel de degradación en el servicio de la red, disminuye el valor de SNIR, entre otros problemas [20]. LTE utiliza la ICIC para gestionar la interferencia intercelular, este mecanismo está presente en el *Release 8* del 3GPP [7]. ICIC también permite a diferentes celdas intercambiar información acerca de las frecuencias programadas para transmisión a fin de reducir o evitar por completo la interferencia

intercelular [53]. La configuración de la herramienta *SNIR maps* incluye un valor de 3 dB para el parámetro ICIC, tal como se ilustra en la Figura 2.15.

Figura 2.15. Configuración de la herramienta *SNIR maps*

También se encuentran los factores de rechazo de interferencia (IRF) que se refieren a la atenuación causada por los filtros del receptor [47]. Se activa el valor de $N = 0$ dado que corresponde al factor de rechazo de interferencia co-canal.

Thermal Noise Floor (KTBF) se refiere al ruido térmico en el receptor, el software utiliza este parámetro para realizar cálculos del desvanecimiento del umbral [54].

Es necesario recalcar que, en el ANEXO III se encuentran más detalles acerca de la configuración de esta herramienta de simulación.

2.4.3. *Throughput mapping*

La opción *Throughput mapping* se selecciona para mostrar un mapa de cobertura de los diferentes niveles de *throughput* alcanzados en las redes implementadas en el software, además el valor de *throughput* se basa en las configuraciones realizadas tanto en el eNodeB como en el cálculo del parámetro SNIR. En la Figura 2.16 se observa la selección de dicha herramienta.

<input type="checkbox"/> Normal distrib % stddev (dB)	5.5
<input checked="" type="checkbox"/> Throughput mapping	...
<input type="checkbox"/> SNIR to QCI mapping	...

Figura 2.16. Selección de la herramienta *Throughput mapping*

2.4.4. RSRQ map

La opción *RSRQ map* permite analizar el parámetro RSRQ mediante un mapa de cobertura, en la Figura 2.17 se observa la configuración realizada en esta herramienta, los valores ingresados corresponden a los valores definidos previamente. El valor de umbral de RSRQ es de -14 dB de acuerdo a [55].

Action	
<input checked="" type="radio"/> RSRQ map (dB)	
<input type="radio"/> Best RSRQ map (#)	
<input type="radio"/> Simultaneous servers	
<hr/>	
<input type="checkbox"/> Normal distrib % stddev:	5.5 dB
<input checked="" type="radio"/> Unwanted = activated	
<input type="radio"/> Unwanted = de-activated and activated	
<hr/>	
RSRQ required	-14 dB
KTBF (1)	-92 dBm
Rx gain	3.01 dB
RSRP threshold	41 ...

Figura 2.17. Configuración de la herramienta *RSRQ map*

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos en términos de RSRP, RSRQ, SNIR y *throughput* para lo cual se presentan mapas de cobertura a fin de visualizar cada parámetro. Las simulaciones de las redes LTE FDD y LTE TDD se realizan mediante el software ICS Designer.

Inicialmente se da a conocer un ejemplo de los mapas de cobertura obtenidos en el software ICS Designer. Posteriormente se realiza el análisis de los parámetros mencionados anteriormente, para lo cual se utilizan gráficos porcentuales que brindan mayor facilidad de entendimiento.

Los resultados se presentan para cada configuración de la red LTE (LTE FDD y LTE TDD). Además, para la red LTE TDD se utiliza las 7 configuraciones diferentes de *DL-to-UL*. Las gráficas que corresponden a los mapas de cobertura de cada parámetro se encuentran disponibles en el ANEXO IV.

3.1. Ejemplos de mapas de cobertura

Para evaluar el rendimiento de las redes LTE mediante los parámetros RSRP, RSRQ, SNIR y *throughput* el software ICS Designer provee de mapas de cobertura que indican la superficie cubierta por cada parámetro, el software asigna diferentes colores dependiendo de la intensidad de la señal.

En la Figura 3.1 se observa un ejemplo del mapa de cobertura del parámetro RSRP de la red LTE FDD. La leyenda ubicada en la parte inferior derecha de la figura, indica los niveles de señal obtenidos según el valor encontrado en el mapa del parámetro RSRP.

De acuerdo con la Tabla 2.1, el nivel de señal excelente corresponde a valores de RSRP mayores o iguales a -80 dBm. El nivel de señal bueno indica que los valores encontrados de RSRP son mayores o iguales a -90 dBm y aproximados a -80 dBm. Por último, el nivel de señal aceptable muestra valores de RSRP mayores o iguales a -100 dBm y aproximados a -90 dBm.

En la Figura 3.2 se presenta un ejemplo del mapa de cobertura de SNIR en la red LTE FDD, en la parte inferior derecha de la figura se observa una leyenda que indica los niveles de señal obtenidos según el valor de SNIR encontrado en el área de cobertura.

Según la Tabla 2.1, el nivel de señal excelente corresponde a valores de SNIR mayores o iguales a 20 dB. El nivel de señal bueno indica que los valores encontrados de SNIR son

mayores o iguales a 13 dB y aproximados a 20 dB. Por último, el nivel de señal aceptable muestra que los valores de SNIR son mayores o iguales a 0 dB y aproximados a 13 dB.

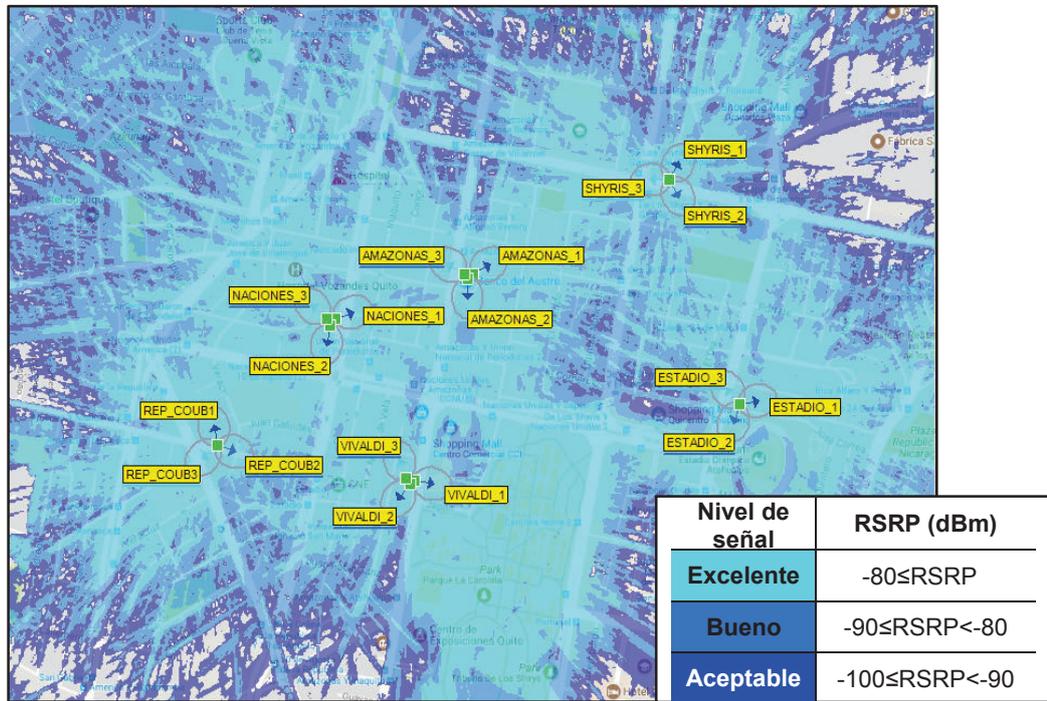


Figura 3.1. Mapa de cobertura de RSRP en la red LTE FDD

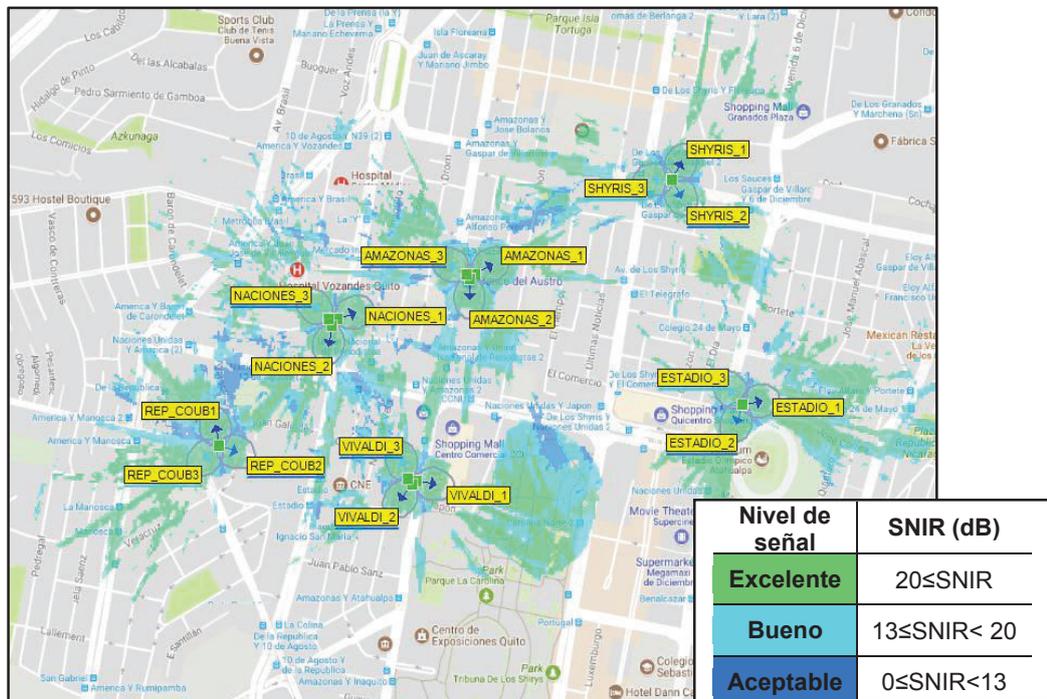


Figura 3.2. Mapa de cobertura de SNIR en la red LTE FDD

Los niveles de *throughput* alcanzados en la red LTE FDD se muestran en la Figura 3.3, la leyenda ubicada en la parte inferior derecha de la figura presenta el rango y el color con el

cual se identifica a cada nivel de *throughput* en el mapa de cobertura. Es necesario recalcar que, los rangos de los valores de *throughput* varían según la configuración del tipo de duplexación.

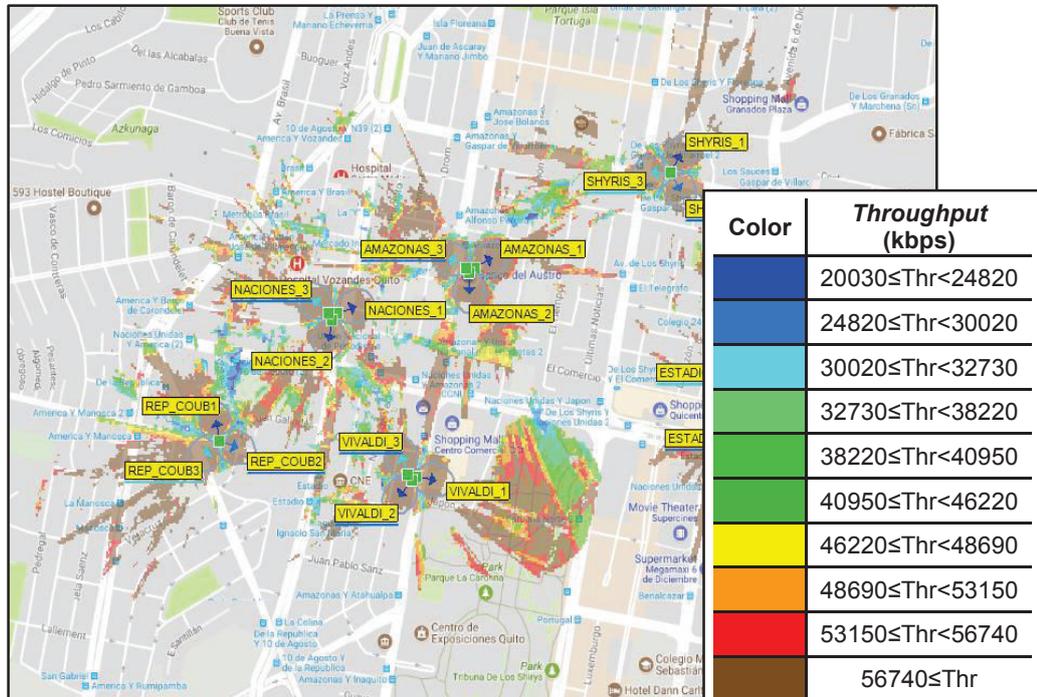


Figura 3.3. Mapa de cobertura de throughput de la red LTE FDD

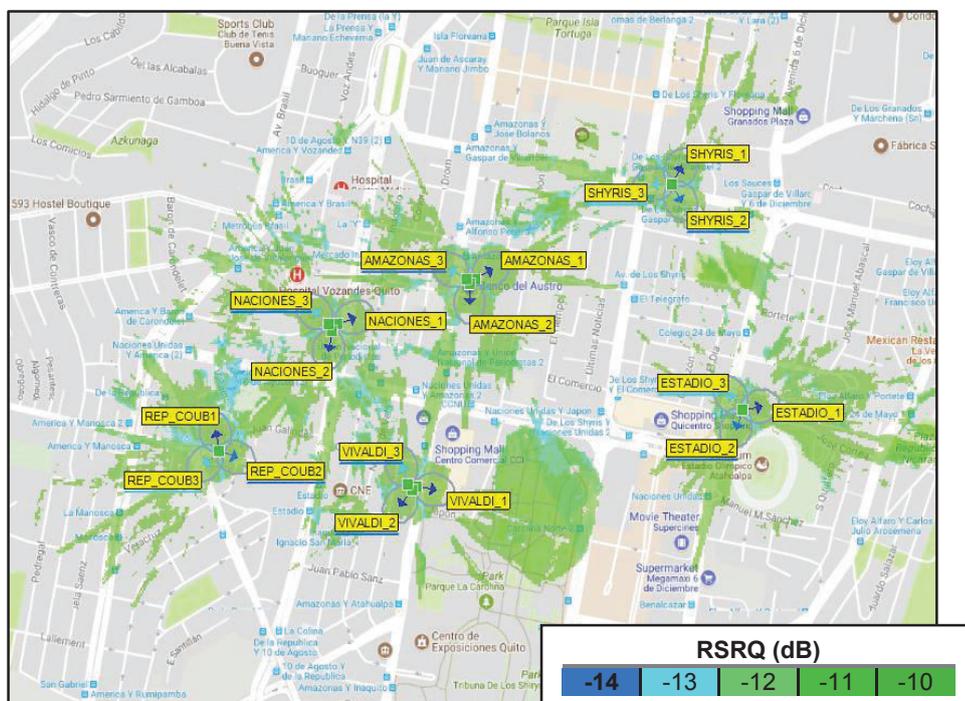


Figura 3.4. Mapa de cobertura de RSRQ de la red LTE FDD

El valor de cada nivel obtenido de RSRQ se identifica según la leyenda ubicada en la parte inferior derecha de la Figura 3.4 para la red LTE FDD. Tanto en LTE FDD y LTE TDD los

valores de RSRQ se representan por diferentes colores en el mapa de cobertura, esto se debe a que ambas redes no poseen niveles de RSRQ con los mismos rangos de análisis.

En cuanto a los mapas de cobertura de RSRP, RSRQ, SNIR y *throughput* de la red LTE TDD con sus 7 configuraciones diferentes de *DL-to-UL* se encuentran en el ANEXO IV.

3.2. Asignación de recursos en enlace descendente

Para el análisis de los resultados se considera la información de la Tabla 3.1, la cual se obtiene mediante el software ICS Designer. En dicha tabla se indica el porcentaje de recursos (subtramas) que se asigna a la red LTE FDD y LTE TDD con las 7 configuraciones diferentes de *DL-to-UL*. Es importante recordar que, en la red LTE FDD las 10 subtramas disponibles se asignan para transmitir los canales y señales en enlace descendente.

Tabla 3.1. Asignación de recursos en la red LTE FDD y LTE TDD

	LTE FDD	LTE TDD-0	LTE TDD-1	LTE TDD-2	LTE TDD-3	LTE TDD-4	LTE TDD-5	LTE TDD-6
Configuración <i>DL-to-UL</i>		0	1	2	3	4	5	6
Configuración de la subtrama especial		4	4	4	4	4	4	4
Número de subtramas para DL	10	2	4	6	6	7	8	3
Número de subtramas especiales		2	2	2	1	1	1	2
Recursos asignados a DL	100%	37,14%	57,14%	77,14%	68,57%	78,57%	88,57%	47,14%

Según la Tabla 3.1, la red LTE FDD asigna la totalidad de sus recursos al enlace descendente. La red LTE TDD con la configuración *DL-to-UL* número 5 asigna el 88,57% de los recursos al enlace descendente, siendo la configuración de la trama tipo 2 que mayor recursos asigna en comparación con las configuraciones *DL-to-UL* restantes.

Con respecto a los valores obtenidos en la Tabla 3.1, se indica un ejemplo de la asignación de recursos para transmisión en enlace descendente en base a los porcentajes obtenidos en el software ICS Designer. Cabe mencionar que en la red LTE TDD, con la configuración número 4 de la subtrama especial, el campo DwPTS dispone de 12 símbolos OFDM, el campo UpPTS cuenta con 1 símbolo OFDM y el campo GP dispone de 1 símbolo OFDM, tal como se describe en el Capítulo 2.

Para el ejemplo se selecciona la configuración *DL-to-UL* número 0, donde se asignan 2 subtramas al enlace descendente y 2 subtramas especiales. La subtrama especial utiliza el campo DwPTS para transmitir en enlace descendente, por lo tanto no utiliza la totalidad de los símbolos OFDM. En la ecuación (3.1) se reemplazan los valores mencionados y se

obtiene un porcentaje de recursos asignados de 37,14%. El software utiliza esta ecuación para el cálculo del porcentaje de recursos asignados al enlace descendente ($\%Recursos_{DL}$) para cada configuración de la red LTE.

$$\%Recursos_{DL} = \frac{\left(N_{sf_DL} + \left(\frac{12 \text{ símbolos OFDM} \times N_{sf_special}}{14 \text{ símbolos OFDM}} \right) \right)}{10 \text{ subtramas}} \times 100\%$$

Ecuación 3.1. Cálculo de la asignación de recursos

Donde:

- N_{sf_DL} : Número de subtramas asignadas al enlace descendente
- $N_{sf_special}$: Número de subtramas especiales según el número de configuración *DL-to-UL* de la trama tipo 2

La asignación de recursos al canal físico PDSCH se analiza en la Tabla 3.2, la cual presenta el porcentaje de recursos asignados al canal PDSCH y la cantidad de RBs que el canal puede utilizar para transmitir los datos de usuario. Los datos de la tabla se obtienen mediante el software ICS Designer.

Tabla 3.2. Asignación de recursos y número de RBs asignados al canal físico PDSCH en LTE FDD y LTE TDD

	LTE FDD	LTE TDD-0	LTE TDD-1	LTE TDD-2	LTE TDD-3	LTE TDD-4	LTE TDD-5	LTE TDD-6
%PDSCH	78,243%	14,141%	34,691%	54,955%	46,539%	56,616%	66,675%	24,474%
RBs utilizables	78	14	34	54	46	56	66	24

La red LTE FDD tiene la mayor asignación de recursos para el canal PDSCH. Para LTE TDD, la configuración *DL-to-UL* número 5 asigna el mayor porcentaje de recursos (66,675%) al canal PDSCH con una diferencia de 11,568% con respecto a LTE FDD.

Es necesario recordar que, LTE TDD tiene menor cantidad de subtramas asignadas al enlace descendente, lo que ocasiona la disminución de recursos asignados en la transmisión.

3.3. Análisis del parámetro RSRP

Los resultados del parámetro RSRP se obtienen mediante la herramienta *Tx/Rx FS* del software ICS Designer. Los resultados se encuentran en el ANEXO IV, donde cada tabla presenta lo siguiente:

- El valor mínimo de RSRP encontrado en el área de cobertura, el cual corresponde a -99 dBm. Además, este valor se encuentra por arriba del umbral de recepción (-100 dBm) configurado en el software, tal como se menciona en la Tabla 2.1 del Capítulo 2.
- El área de cobertura en unidades de km², que corresponde al área del mapa que cuenta con valores de RSRP por encima del umbral de recepción.
- El porcentaje de cobertura que corresponde a cada nivel de señal dentro del área de cobertura.

3.3.1. Análisis del área de cobertura

Para el análisis del área de cobertura se realiza un resumen de los resultados obtenidos mediante el software ICS Designer, dichos resultados se encuentran en el ANEXO IV.

En la Figura 3.5 se presenta el área de cobertura para cada red LTE con su correspondiente tipo de duplexación. En la red LTE FDD se obtiene un área de cobertura de 5,34 km². La red LTE TDD con sus 7 configuraciones diferentes de *DL-to-UL* presenta una variación en el área de cobertura debido a las diferentes asignaciones de recursos, tal como se indicó en la Tabla 3.1.

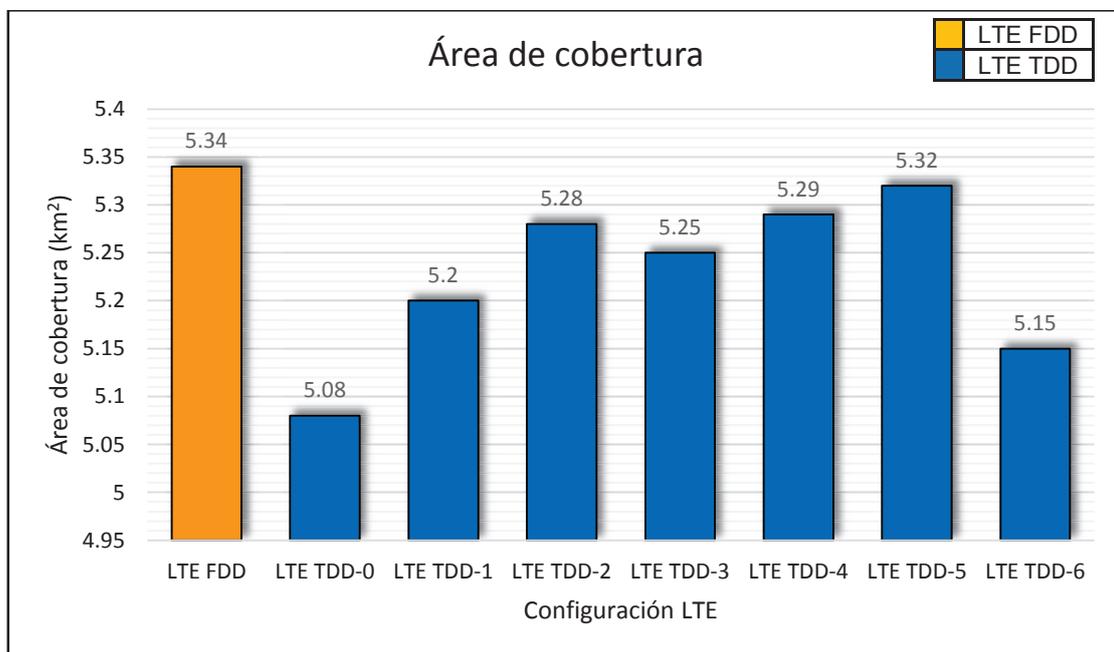


Figura 3.5. Comparación del área de cobertura de RSRP

En LTE TDD, la configuración 0 muestra un área de cobertura de 5,08 km², es decir, disminuye en 0,6 km² con respecto a LTE FDD, esto se debe a que apenas el 37,14% de los recursos son asignados a las transmisiones en enlace descendente. Al utilizar la configuración número 6 el área de cobertura disminuye en 0,19 km² con respecto a LTE

FDD, esta configuración asigna el 47,14% de los recursos a la transmisión en enlace descendente.

Continuando con el análisis, la red LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 5 presenta un área de cobertura de 5,32 km². Esta configuración se acerca al valor del área de cobertura obtenido en LTE FDD, con apenas el 0,02% de diferencia, dado que el 88,57% de los recursos se asigna al enlace descendente.

Finalmente, la red LTE TDD con las configuraciones 1, 2, 3 y 4 presentan un aumento del área de cobertura con respecto a LTE TDD-0 y LTE TDD-6; sin embargo, el área de cobertura es menor con respecto a LTE FDD y LTE TDD-5.

La potencia de transmisión de la portadora es mayor en LTE FDD, de esta manera se logra mayor cobertura con respecto a las 7 configuraciones diferentes de *DL-to-UL* de LTE TDD. Además, LTE FDD utiliza las 10 subtramas para las transmisiones en enlace descendente, lo que implica mayor cantidad de recursos con respecto a LTE TDD.

3.3.2. Análisis del nivel de señal

El software expresa el valor de RSRP en dBm, dado que indica los niveles de intensidad de las señales de referencia específicas de la celda. Previo al análisis del nivel de señal, la Figura 3.6 presenta un ejemplo de la localización de las señales de referencia tanto en LTE FDD como en LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 0.

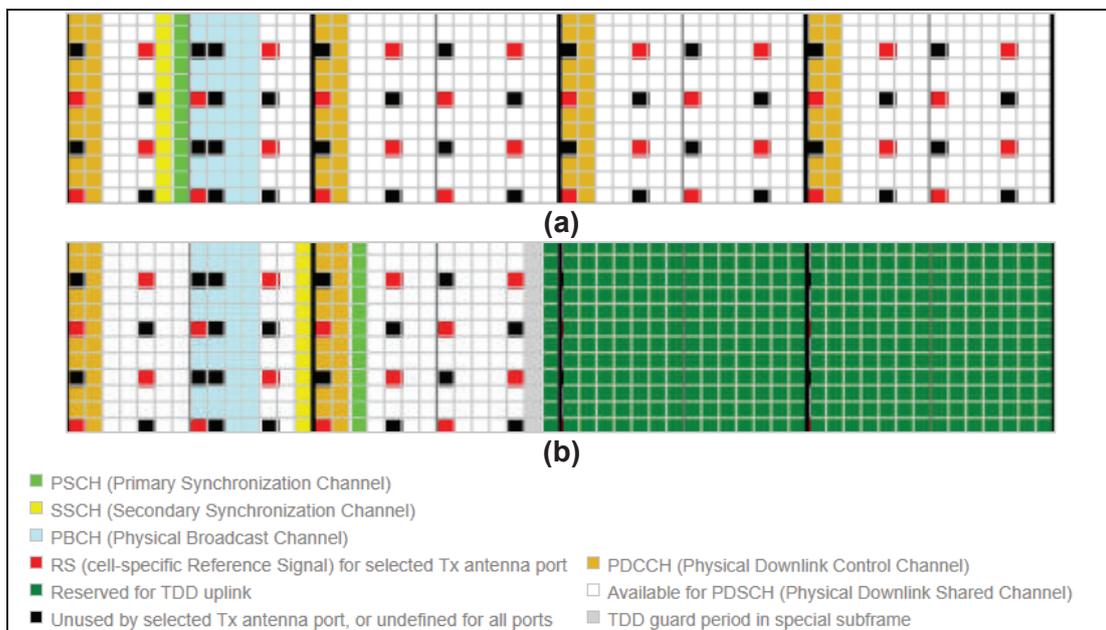


Figura 3.6. Ejemplo de la localización de las señales de referencia en las subtramas de (a) LTE FDD y (b) LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 0 [56]

Para la estructura de la trama tipo 1 de LTE, se observa en la Figura 3.6 (a) que cada una de las 4 subtramas poseen REs que transportan señales de referencia. Por el contrario, en la Figura 3.6 (b), que corresponde a la estructura de la trama tipo 2, se ilustra que solo las subtramas destinadas para el enlace descendente poseen REs que transportan señales de referencia.

Continuando con el análisis del parámetro RSRP, la Figura 3.7 presenta el valor de RSRP para cada red LTE con su configuración de tipo de duplexación, los porcentajes mostrados son una recopilación de los resultados obtenidos mediante simulación, los mismos que se encuentran en el ANEXO IV.

Para el nivel de señal excelente, donde los valores de RSRP son mayores o iguales a -80 dBm el usuario percibe un excelente servicio. El nivel de señal bueno cuenta con valores de RSRP cercanos a -80 dBm hasta -90 dBm, lo cual implica la degradación de la calidad de la señal.

Igualmente, para el nivel de señal aceptable se tiene valores de RSRP que van desde valores cercanos a -90 dBm hasta -100 dBm, lo cual implica una mayor degradación de la señal con respecto al nivel bueno.

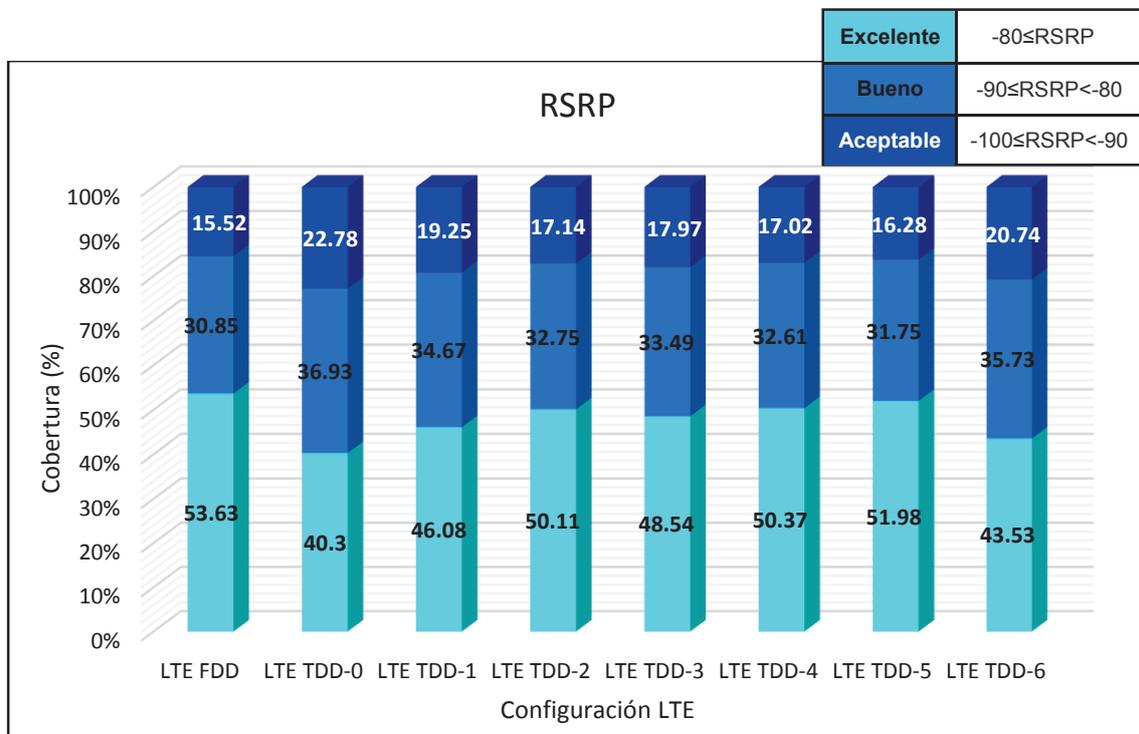


Figura 3.7. Comparación del nivel de señal de RSRP

La señal de nivel excelente se logra para los usuarios que se localizan en áreas cercanas al eNodeB de la celda servidora, mientras más lejos se encuentra el usuario de la estación base mayor será la degradación de la señal debido a las pérdidas que existen durante la propagación de la señal entre el transmisor y el receptor.

La red LTE FDD posee el mayor porcentaje de cobertura para un nivel de señal excelente, el cual es de 53,63% del área de cobertura. El 46,37% del área de cobertura posee un nivel de señal entre valores bueno y aceptable.

Para los diferentes casos de LTE TDD se determina que los porcentajes de cobertura son menores con respecto a la red LTE FDD para niveles de señal excelente. LTE TDD-0 tiene un porcentaje de cobertura de 40,3% para el nivel de señal excelente y el 59,7% del área de cobertura posee niveles de señal entre valores bueno y aceptable, esto se debe a que la configuración *DL-to-UL* número 0 asigna la menor cantidad de recursos para el enlace descendente lo cual implica que existe menor cantidad de REs transportando señales de referencia.

Las configuraciones 1, 3 y 6 de la red LTE TDD tienen un porcentaje del área de cobertura de 40,3%, 46,08% y 43,53% respectivamente, con niveles de señal excelente.

En LTE TDD-4 el porcentaje de cobertura para el nivel de señal excelente es de 50,37% con una diferencia del 3,26% respecto a LTE FDD. Al utilizar la configuración *DL-to-UL* número 2, la red LTE TDD posee un nivel de señal excelente en el 50,11% de su área de cobertura y el 49,89% de su área de cobertura posee niveles de señal entre valores bueno y aceptable.

Con LTE TDD-5 se obtiene un porcentaje de cobertura de 51,98% para el nivel de señal excelente y el 48,08% del área de cobertura tiene niveles de señal entre valores bueno y aceptable. Aunque esta configuración de LTE TDD permite un área de cobertura mayor con respecto a las demás configuraciones de LTE TDD, no presenta mayor porcentaje de cobertura para un nivel de señal excelente con respecto a LTE FDD.

En consecuencia, LTE FDD posee un mayor porcentaje de nivel de señal excelente en comparación con LTE TDD dado que utiliza el 100% de sus recursos. Si bien, las configuraciones diferentes de LTE TDD indican menor porcentaje de cobertura de nivel de señal excelente también indican mayor porcentaje de cobertura con niveles de señal bueno y aceptable.

3.4. Análisis del parámetro SNIR

A través de la herramienta *Map SNIR* del software ICS Designer se obtienen los mapas de cobertura del parámetro SNIR, los resultados se presentan en el ANEXO IV.

Es necesario recalcar que el valor de piso de ruido (KTBF) configurado para la recepción es de -92 dBm tal como se indicó en el Capítulo 2.

En el presente trabajo, el análisis del parámetro SNIR se realiza únicamente para el canal físico PDSCH. Los resultados que otorga el software se indican mediante la relación *Carrier to Interference (C/I)* en dB.

Las tablas de los resultados que corresponden al parámetro SNIR se encuentran en el ANEXO IV, las cuales presentan los siguientes datos:

- El valor mínimo de SNIR encontrado en el mapa de cobertura, el cual corresponde a 6 dB para LTE FDD, 2 dB para LTE TDD-0, 4 dB para LTE TDD-1, 5 dB para LTE TDD-2, 4 dB para LTE TDD 3, 5 dB para LTE TDD-4, 5 dB para LTE TDD-5 y 3 dB para LTE TDD-6.
- El área de cobertura en unidades de km², que corresponde al área de cobertura del parámetro SNIR.
- El porcentaje de cobertura que corresponde a cada nivel de señal dentro del área de cobertura.

3.4.1. Análisis del área de cobertura

El software presenta valores de SNIR que van de acuerdo con el porcentaje de recursos asignados al canal físico PDSCH y con el nivel del piso de ruido, es decir, para valores de nivel de señal que se encuentran por debajo del piso de ruido no se obtienen niveles óptimos de SNIR, por lo tanto, no se consideran.

Adicionalmente, el valor mínimo encontrado de SNIR influye en la presentación del mapa de cobertura que brinda el software. Mientras mayor cantidad de valores de SNIR se obtengan mayor será el área total de cobertura que se presente en las simulaciones, adicionalmente, los parámetros RSRQ y *throughput* presentan la misma área de cobertura que SNIR.

La Figura 3.8 presenta el área de cobertura del parámetro SNIR para cada configuración de red LTE, los porcentajes mostrados son una recopilación de los resultados obtenidos mediante simulación, los cuales se encuentran en el ANEXO IV.

En la red LTE FDD se consigue un área de cobertura de 0,91 km² mientras que la red LTE TDD con sus 7 configuraciones diferentes de *DL-to-UL* presenta valores de área de cobertura que van desde 0,87 km² hasta 1,01 km².

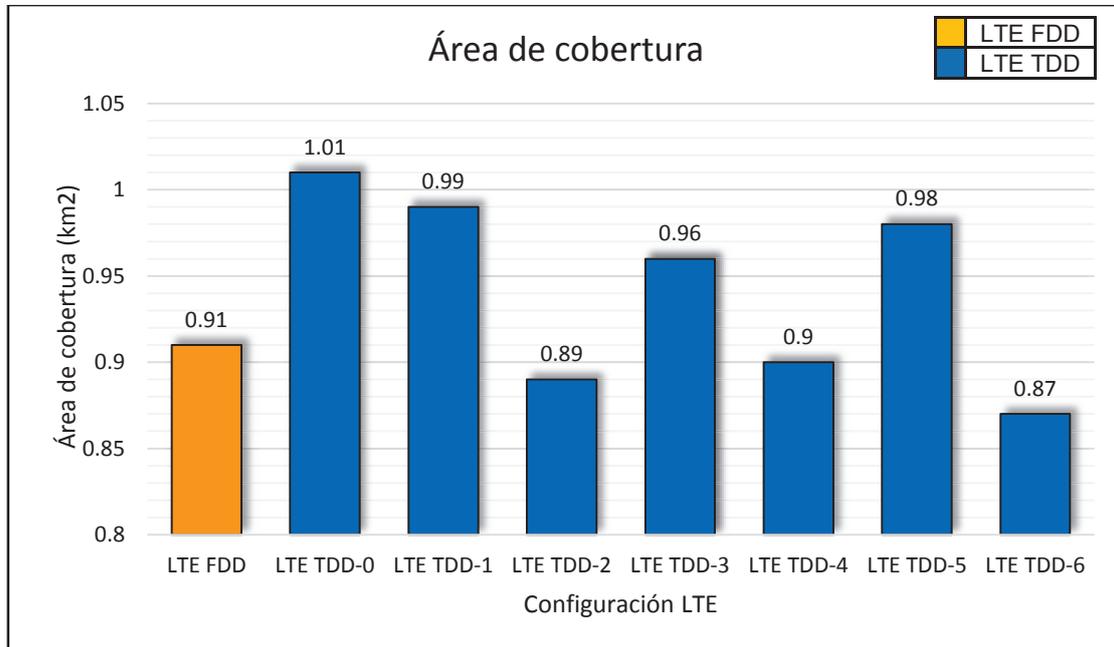


Figura 3.8. Comparación de área de cobertura de SNIR

3.4.2. Análisis del nivel de señal

El valor de SNIR se expresa en dB y representa la relación entre el nivel de potencia de la señal (potencia del canal PDSCH) con respecto a los niveles de ruido e interferencia ocasionada por las celdas vecinas, también considera el esquema de modulación utilizado para decodificar los datos de usuario.

La Figura 3.9 presenta el valor de SNIR de cada red LTE con su correspondiente tipo de duplexación, los porcentajes mostrados parten de la recopilación de los resultados obtenidos mediante simulación, los cuales se encuentran en el ANEXO IV.

Para el análisis se toma en cuenta los niveles de señal excelente, bueno y aceptable. El nivel de señal excelente se caracteriza para valores de SNIR mayores o iguales a 20 dB. Así mismo, el nivel de señal bueno va desde valores mayores o iguales a 13 dB hasta aproximadamente 20 dB y el nivel de señal aceptable tiene un rango de valores mayores o iguales a 0 dB hasta valores aproximados a 13 dB. Valores por debajo de 0 dB indican una mala calidad de la señal.

Como se observa en la Figura 3.9, LTE FDD tiene el 56,71% de su área de cobertura con un nivel de SNIR excelente, en contraste con LTE TDD que posee en todas sus configuraciones menor porcentaje de cobertura de nivel de señal excelente.

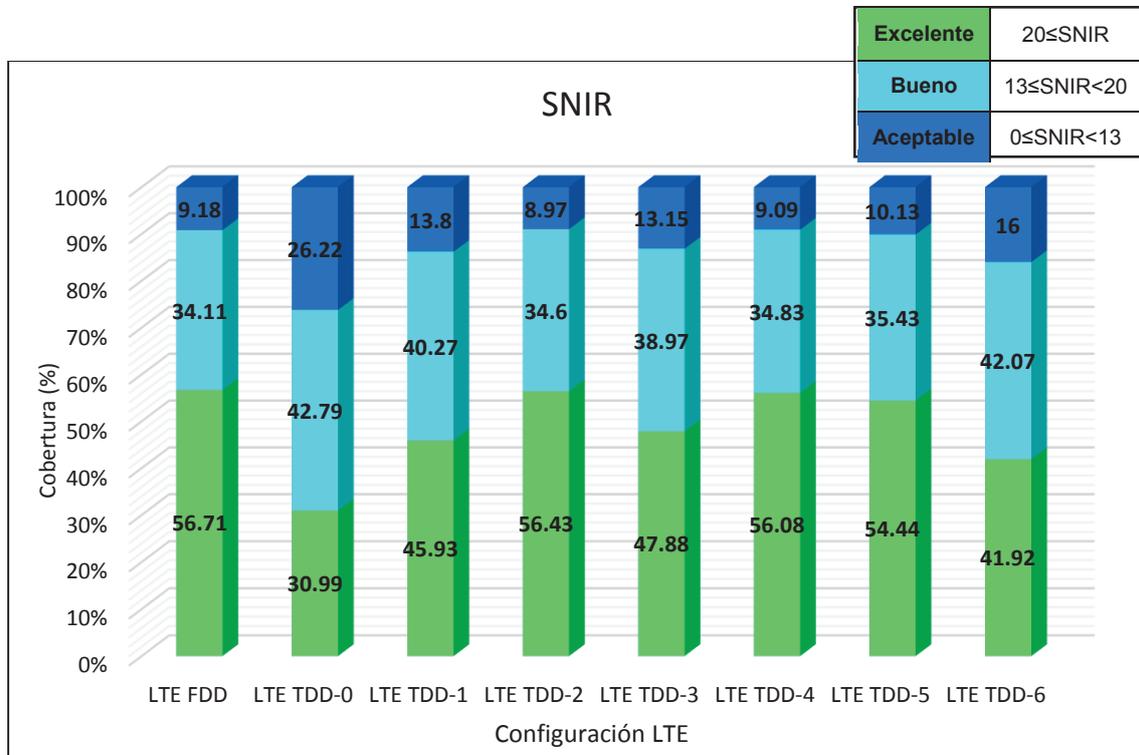


Figura 3.9. Comparación de los niveles de SNIR

En la red LTE TDD, la configuración *DL-to-UL* número 0 presenta el 30,99% de su área de cobertura con niveles de señal excelente, dejando el 69,01% de la red con porcentajes de cobertura de niveles de señal entre valores bueno y aceptable.

Los resultados obtenidos para LTE TDD con las configuraciones 2, 4 y 5 muestran porcentajes de cobertura de nivel de señal excelente cercanos a LTE FDD, sus porcentajes difieren en apenas 0,28%, 0,63% y 2,27% respectivamente en comparación con LTE FDD.

LTE TDD-2 brinda un nivel excelente de SNIR al 45,93% de su área de cobertura, mientras el 54,07% del área de cobertura cuenta con niveles de señal entre valores bueno y aceptable. El 41,92% del área de cobertura de LTE TDD-6 presenta niveles de señal excelente y el 58,08% posee niveles de señal entre valores bueno y aceptable.

Por consiguiente, los resultados obtenidos reflejan que la red LTE FDD presenta mejor calidad de la señal debido a que la mayor parte de su área de cobertura posee niveles excelentes de SNIR.

Cabe indicar que, los valores mínimos encontrados de SNIR en cada configuración de LTE forman parte del nivel de señal aceptable, valores por debajo del mínimo encontrado indican que la calidad de la señal se degrada. El nivel de SNIR es excelente en las zonas cercanas al eNodeB. Cuando el usuario se aleja de la estación base servidora el nivel de SNIR disminuye.

Analizando los mapas de cobertura del parámetro SNIR, disponibles en el ANEXO IV, se visualiza que las zonas donde mayor separación existe entre eNodeBs tienen menor afectación por la interferencia de las celdas vecinas.

3.5. Análisis del parámetro *throughput*

En el ANEXO IV se presenta los niveles de *throughput* obtenidos mediante la opción *Throughput mapping* de la herramienta *SNIR Map* del software ICS Designer. Los resultados obtenidos presentan la siguiente información:

- Los niveles de *throughput* encontrados en cada red LTE.
- El porcentaje de cobertura de cada nivel de *throughput* dentro del área de cobertura.

3.5.1. Red LTE FDD

En la Figura 3.10 se observan los niveles de *throughput* para el enlace descendente en la red LTE FDD. Para LTE FDD, el 50,67% del área de cobertura muestra niveles de *throughput* mayores o iguales a 56740 kbps. Lo que implica que el usuario se encuentra en alguna zona cercana al eNodeB.

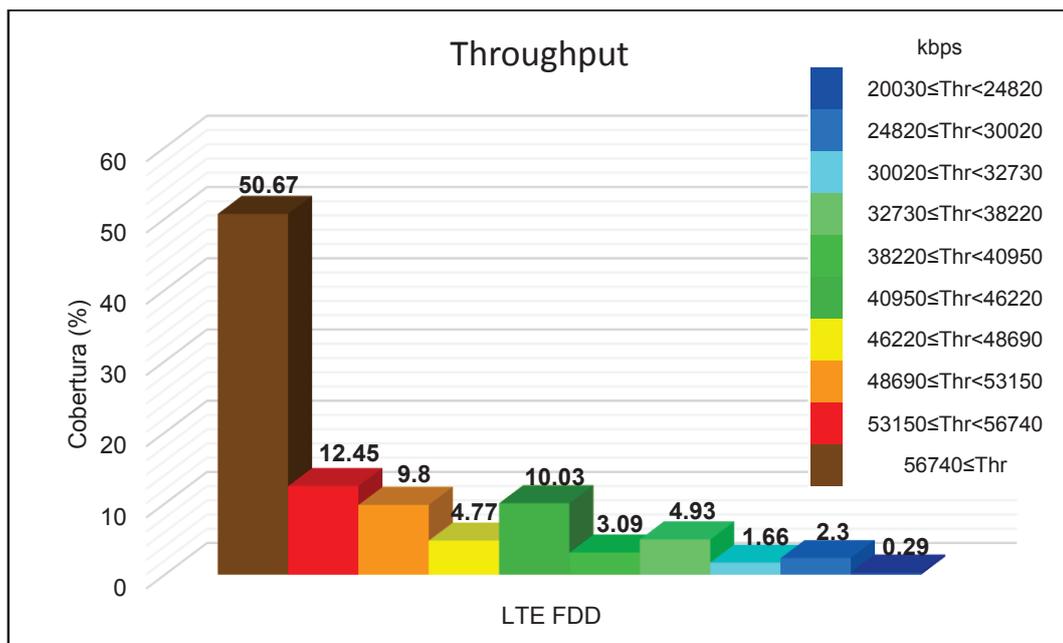


Figura 3.10. Porcentajes de cobertura de los niveles de *throughput* en LTE FDD

El 12,45% del área de cobertura tiene niveles de *throughput* que van desde 53150 kbps hasta valores aproximados a 56740 kbps. Las zonas más distantes a los eNodeBs presentan niveles de *throughput* desde 20030 kbps hasta valores cercanos a 24820 kbps con un porcentaje de cobertura del 0,29%.

3.5.2. Red LTE TDD

Los resultados obtenidos en la red LTE TDD presentan variaciones significantes en comparación con los resultados de la red LTE FDD, por tal motivo el análisis se enfoca en los niveles máximos y mínimos de *throughput* obtenidos.

a) Configuración *DL-to-UL* número 0

La Figura 3.11 presenta los niveles de *throughput* alcanzados en LTE TDD-0. El 25,84% del área de cobertura muestra niveles de valores mayores o iguales a 10180 kbps, los niveles de *throughput* que varían desde 9160 kbps hasta valores aproximados a 10180 kbps tienen un porcentaje de cobertura del 17,21%.

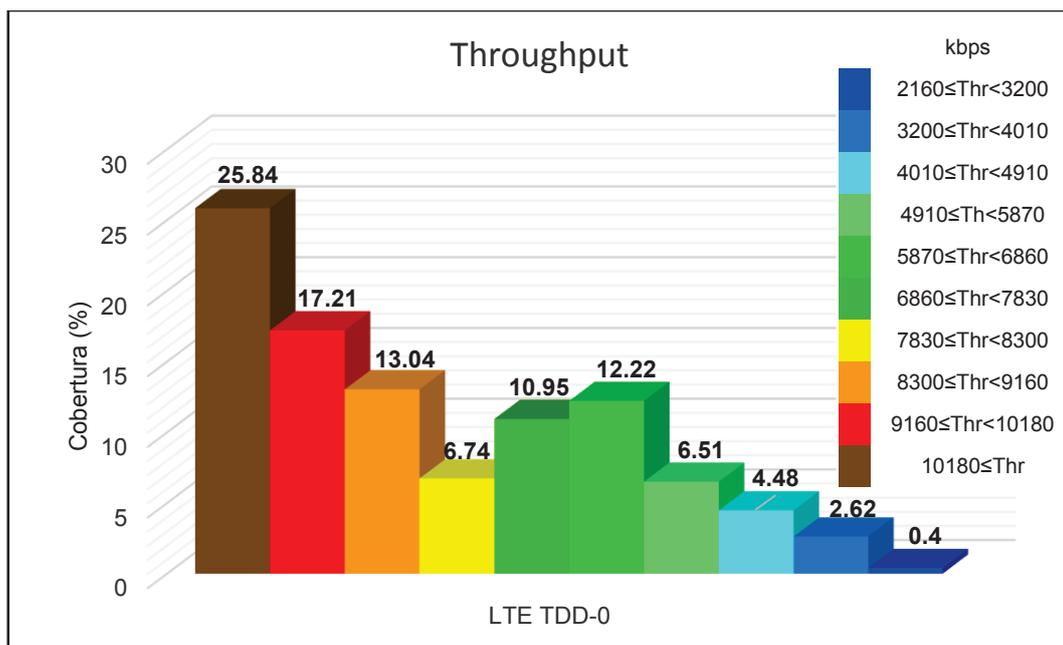


Figura 3.11. Porcentajes de cobertura de los niveles de *throughput* en LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 0

Para las zonas más alejadas de los eNodeBs se obtienen niveles de *throughput* que van desde 2160 kbps hasta aproximadamente 3200 kbps, esto se debe a que mientras mayor distancia existe entre el transmisor y receptor mayor niveles de interferencia afectan al rendimiento de la red y menor es el valor de SNIR.

b) Configuración *DL-to-UL* número 1

Para el caso de LTE TDD-1, los resultados muestran niveles de *throughput* mayores al obtenido con respecto a LTE TDD-0; sin embargo, la red LTE FDD aún presenta niveles mayores de *throughput* con respecto a LTE TDD-0 y LTE TDD-1.

En la Figura 3.12 se observan los niveles de *throughput* para la red LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 1, el 39,79% del área de cobertura presenta niveles de *throughput* mayores o iguales a 24730 kbps, los niveles restantes de *throughput* tienen porcentajes de cobertura menores al 14%.

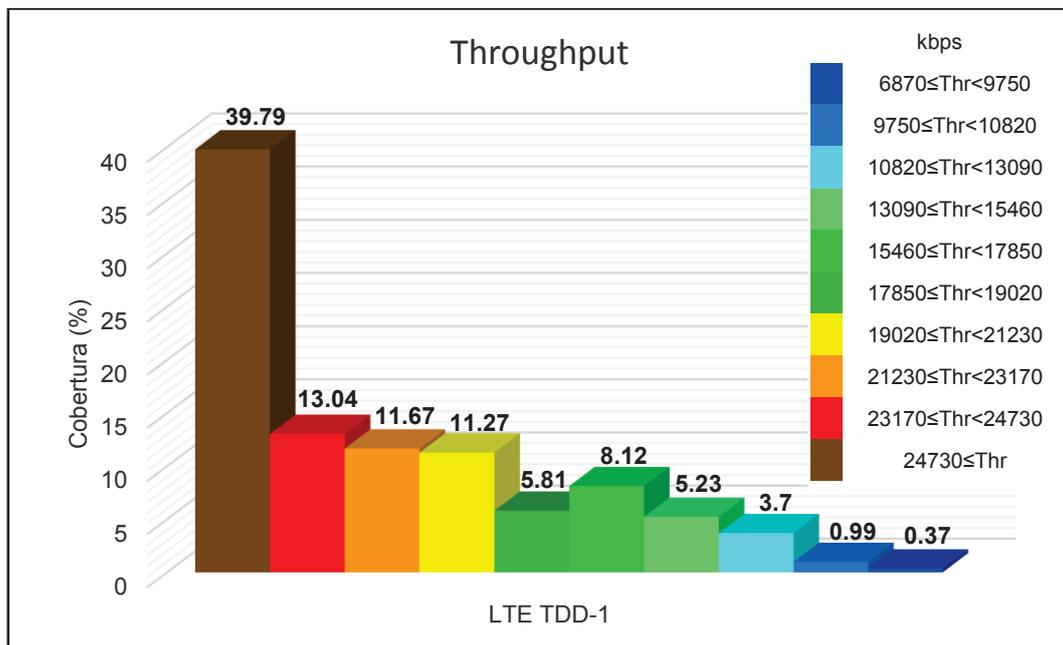


Figura 3.12. Porcentajes de cobertura de los niveles de *throughput* en LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 1

El nivel mínimo de *throughput* en LTE TDD-1 se encuentra en el rango desde 6870 kbps hasta aproximadamente 9750 kbps, además, tiene un porcentaje del área de cobertura de 0,37%.

c) Configuración *DL-to-UL* número 2

En la Figura 3.13 se observan los niveles de *throughput* alcanzados en la red LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 2. El 50,41% del área de cobertura presenta niveles de *throughput* de valores mayores o iguales a 39280 kbps.

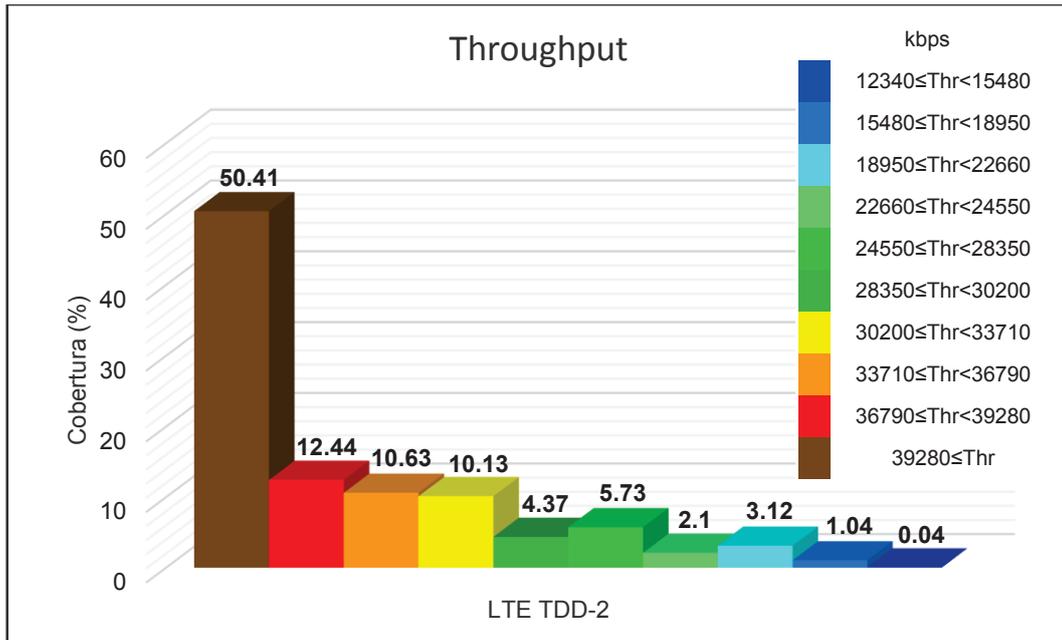


Figura 3.13. Porcentajes de cobertura de los niveles de *throughput* obtenidos en LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 2

Así mismo, el rango que contiene niveles bajos de *throughput* varía desde 12340 kbps hasta aproximadamente 15480 kbps con un porcentaje del área de cobertura de 0,04%, cabe recordar que niveles bajos de *throughput* se obtienen en lugares alejados de los eNodeBs.

d) Configuración *DL-to-UL* número 3

En la Figura 3.14 se aprecia los niveles de porcentaje de cobertura de *throughput* que el software presenta para la red LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 3.

Para niveles de *throughput* de valores mayores o iguales a 33460 kbps se obtiene un porcentaje de cobertura del 41,57%. Con LTE TDD-3 se observan valores de *throughput* cercanos a los resultados de LTE TDD-2, ya que según la Tabla 3.2 el porcentaje de carga asignado al canal físico PDSCH es de 54,955% en LTE TDD-3 y de 46,539% en LTE TDD-2.

De igual manera, esta configuración muestra niveles bajos de *throughput* los cuales varían desde 9290 kbps hasta valores cercanos a 13190 kbps con un porcentaje del área de cobertura del 0,32%.

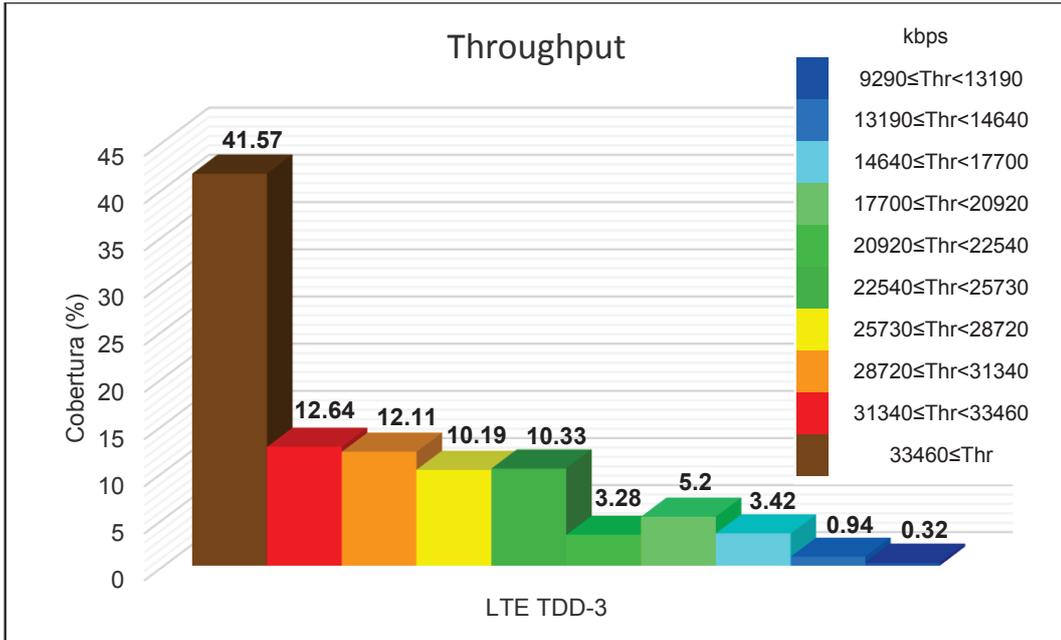


Figura 3.14. Porcentajes de cobertura de los niveles de *throughput* obtenidos en LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 3

e) Configuración *DL-to-UL* número 4

La Figura 3.15 presenta los niveles de *throughput* alcanzados en la red LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 4. El 50,16% del área de cobertura muestra niveles de valores mayores o iguales a 40730 kbps.

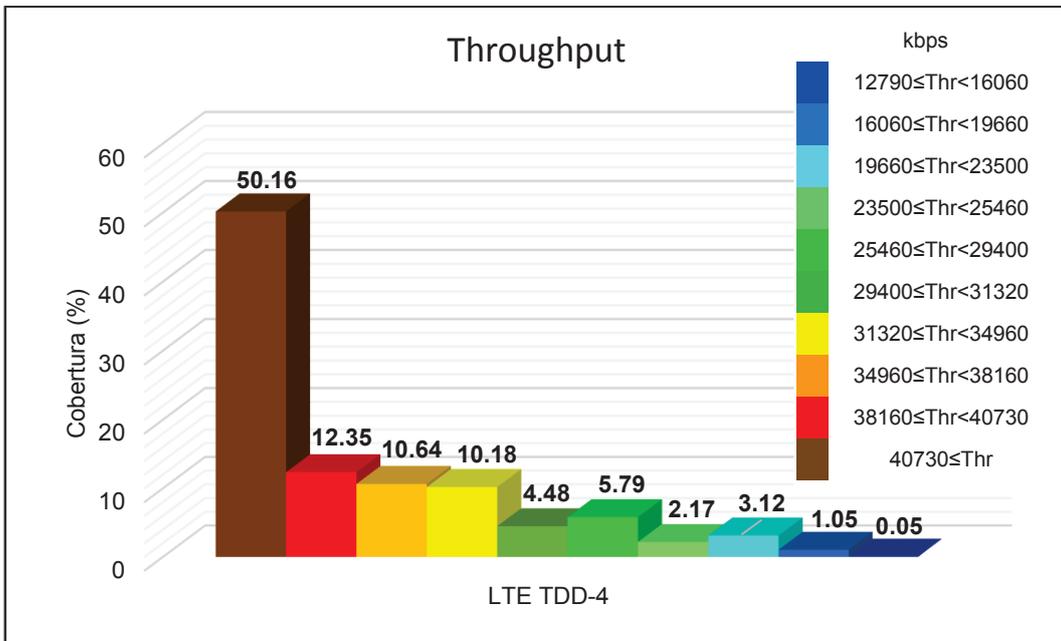


Figura 3.15. Porcentajes de cobertura de los niveles de *throughput* obtenidos en LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 4

Igualmente, los gráficos de mapas de cobertura muestran que se obtienen niveles bajos de *throughput* en los lugares alejados de las estaciones base, los niveles van desde 12790 kbps hasta valores aproximados a 16060 kbps con un porcentaje del área de cobertura de 0,05%.

f) Configuración DL-to-UL número 5

En la Figura 3.16 se presentan los niveles de *throughput* de LTE TDD-5. Para los niveles de *throughput* de igual o mayor valor a 48010 kbps se tiene un porcentaje del área de cobertura de 48,37%.

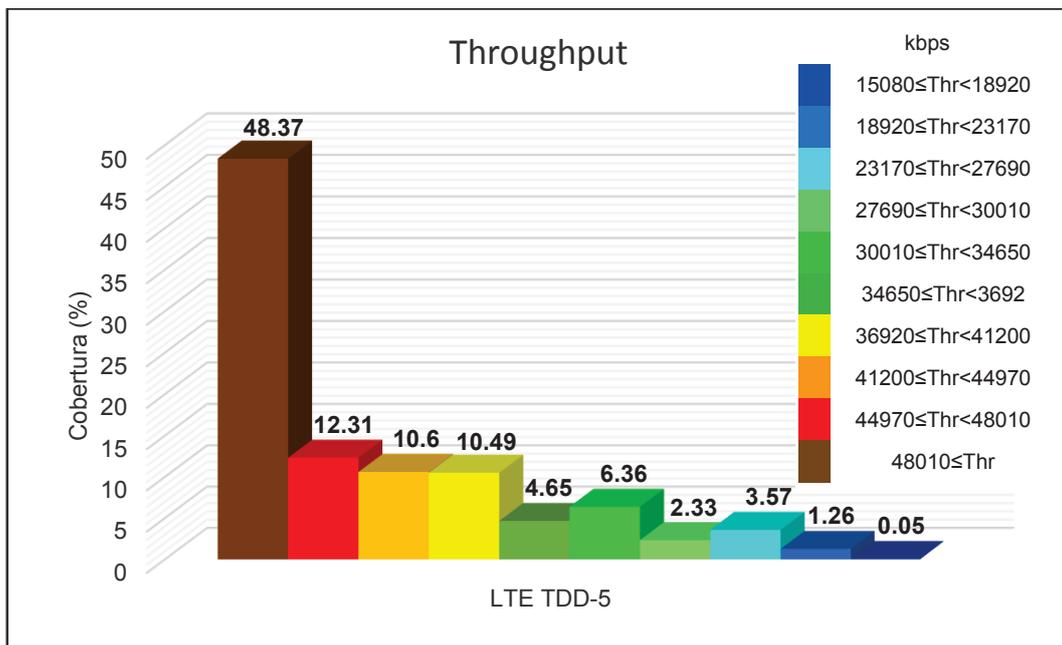


Figura 3.16. Porcentajes de cobertura de los niveles de *throughput* obtenidos en LTE TDD con configuración DL-to-UL número 5

Al igual que en las configuraciones previas, LTE TDD-5 muestra el rango de valores en donde se consigue el menor *throughput* de la red, estos valores van desde 15080 kbps hasta valores aproximados a 18920 kbps con un porcentaje de área de cobertura de 0,05%.

g) Configuración DL-to-UL número 6

Por último, la Figura 3.17 indica los niveles de *throughput* alcanzados en LTE TDD-6, donde los valores mayores o iguales a 17460 kbps tienen un porcentaje del área de cobertura del 36,11%. El rango de valores que va desde 4260 kbps hasta 6160 kbps presenta el 0,28% de cobertura y pertenece al menor nivel de *throughput* que se obtiene en LTE TDD-6.

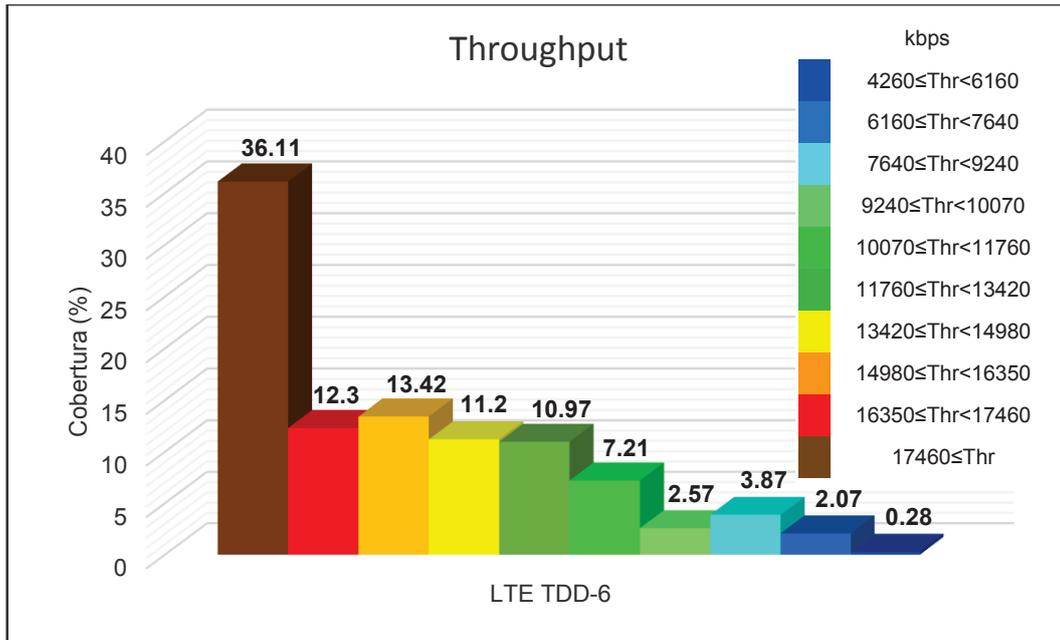


Figura 3.17. Porcentajes de cobertura de los niveles de *throughput* obtenidos en LTE TDD con configuración *DL-to-UL* número 6

Los resultados analizados indican que mientras mayor cantidad de recursos se asigna al canal PDSCH y mientras mayor sea el valor de SNIR mayor será el nivel de *throughput* conseguido en la red. Por ello, en LTE FDD se consigue niveles de *throughput* altos en comparación con LTE TDD. LTE TDD-4 y 5 presentan los niveles de *throughput* más altos de la red LTE TDD.

En la Figura 3.18 se presenta un resumen de las equivalencias porcentuales de los niveles de *throughput* alcanzados en cada red LTE (LTE FDD y LTE TDD) con base en los valores inferiores de los rangos de niveles máximos de *throughput* obtenidos mediante simulaciones y presentados previamente en gráficos porcentuales.

En LTE FDD se alcanzan valores de *throughput* que se encuentran dentro del rango de valores mayores o iguales a 56740 kbps. Las 7 diferentes configuraciones *DL-to-UL* de la red LTE TDD presentan niveles inferiores de *throughput* en comparación con la red LTE FDD, por lo tanto, para el siguiente análisis se considera que el valor de *throughput* de la red LTE FDD representa una equivalencia porcentual del 100% de *throughput*.

La configuración *DL-to-UL* número 0 de LTE TDD logra un valor de *throughput* de 10180 kbps, es decir, alcanza el 17,94% del *throughput* encontrado en la red LTE FDD. Así mismo, con LTE TDD-6 se consigue un valor de *throughput* de 17460 kbps, es decir, se obtiene el 30,77% del *throughput* obtenido en LTE FDD.

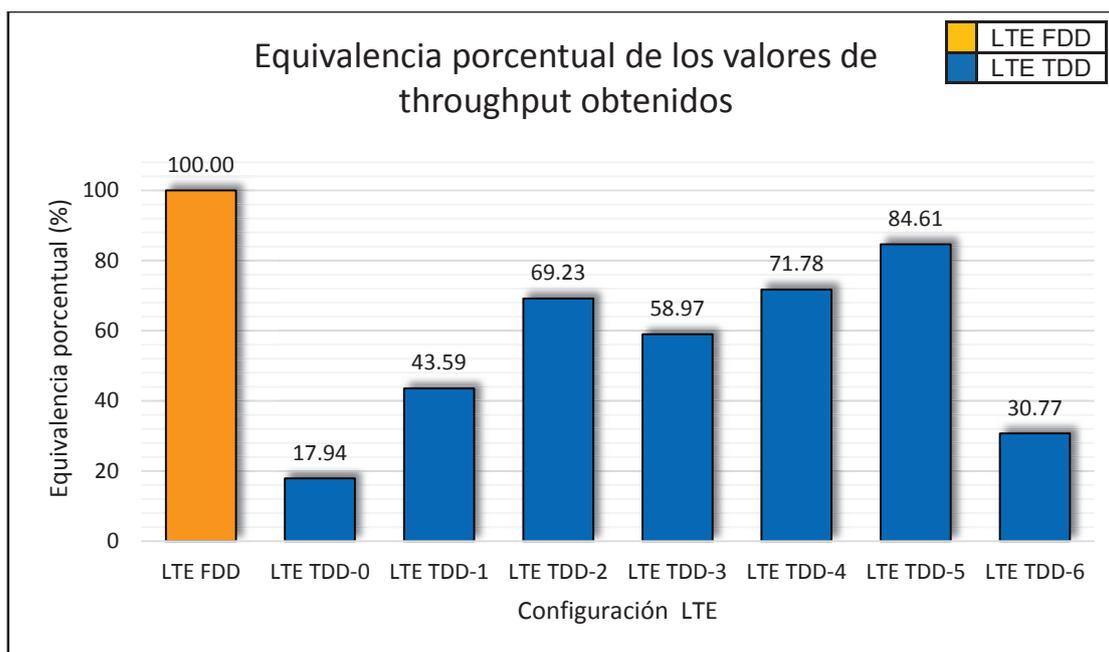


Figura 3.18. Equivalencia porcentual de los valores de throughput obtenidos en las redes LTE (LTE FDD y LTE TDD)

La configuración LTE TDD-5 presenta un valor de *throughput* de 48010 kbps, lo cual representa el 84,61% del nivel de *throughput* obtenido con LTE FDD, esta configuración de LTE TDD presenta el valor de *throughput* más cercano al obtenido en la red LTE FDD.

3.6. Análisis del parámetro RSRQ

Los resultados de RSRQ se obtienen a través de la herramienta *RSRQ Map* del software ICS Designer, dichos resultados se encuentran en el ANEXO IV.

En la Figura 3.19 se indica un resumen del porcentaje del área de cobertura de cada nivel de RSRQ, cada valor de RSRQ se expresa mediante la relación *Carrier to Interference (C/I)* en dB. Adicionalmente, se recuerda que, el valor de umbral requerido del parámetro RSRQ es de -14 dB a fin de garantizar un nivel de confiabilidad de la calidad de la señal, este valor se define en el Capítulo 2.

En base a los resultados obtenidos se presenta el análisis del parámetro RSRQ con respecto a diferentes valores de C/I para las redes LTE FDD y LTE TDD. Los valores de RSRQ mayores o iguales a -10 dB indican una calidad de señal excelente y los valores dentro del rango desde aproximadamente -10 dB hasta valores mayores o iguales a -15 dB indican una calidad de señal buena.

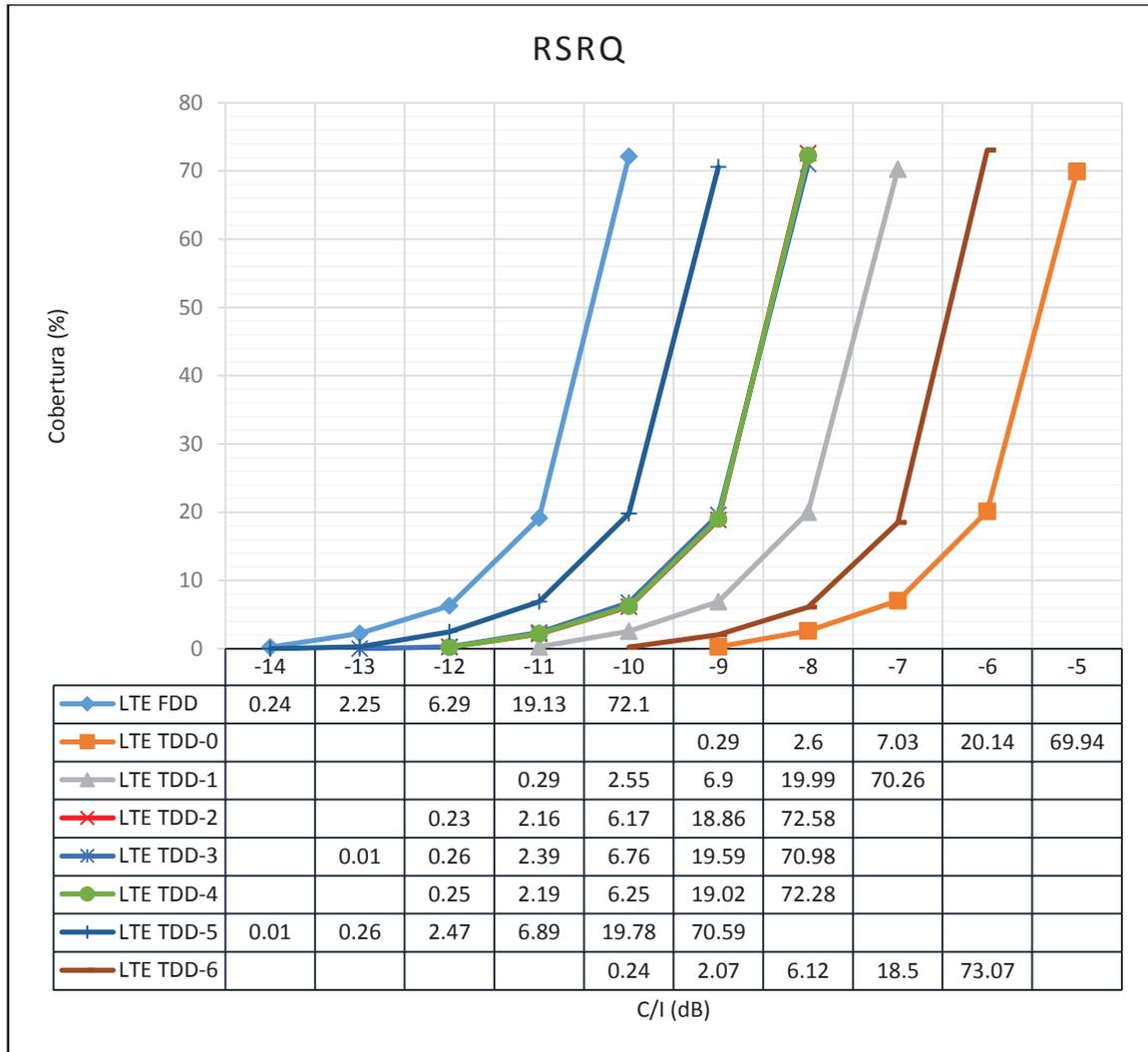


Figura 3.19. Comparación de porcentajes de cobertura del parámetro RSRQ entre las redes LTE FDD y LTE TDD

En la red LTE FDD se obtiene valores de RSRQ que van desde -10 dB hasta -14 dB. El 72,1% del área de cobertura de la red LTE FDD posee una calidad de señal excelente y el 26,55% del área de cobertura cuenta con una calidad de señal buena.

Con respecto a LTE TDD, LTE TDD-0 presenta niveles excelentes de la calidad de la señal con un nivel de -5 dB en el 69,94% de su área de cobertura. LTE TDD-1 también presenta niveles excelentes de señal, donde el valor de RSRQ que sobresale es de -7 dB en el 70,26% de su área de cobertura.

Las configuraciones *DL-to-UL* número 2 y 4 de LTE TDD presentan excelentes niveles de calidad de señal en más del 72% de su área de cobertura. Para un nivel bueno de calidad de señal, LTE TDD-2 y LTE TDD-4 cuentan con un valor mínimo de -12 dB en el 0,23% y 0,25% de su área de cobertura respectivamente.

Con LTE TDD-6 el nivel de RSRQ de -6 dB predomina en el 73,07% de su área de cobertura, brindando un nivel excelente de calidad de señal. Con la configuración número 3 de LTE TDD se obtiene un nivel de -8 dB en el 70,98% de su área de cobertura y con la configuración número 5 se indica un nivel de -9 dB en el 70,59% de su área de cobertura.

LTE FDD al igual que las configuraciones *DL-to-UL* número 0, 6 y 1 de LTE TDD presentan niveles excelentes de RSRQ en la mayor parte de su área de cobertura.

4. CONCLUSIONES

En este capítulo se recogen las principales conclusiones y recomendaciones de este Trabajo de Titulación.

4.1. Conclusiones

- ✓ En este Trabajo de Titulación se evaluó experimentalmente el rendimiento de los tipos de duplexación que permite LTE, se diseñó, implementó y simuló una red LTE FDD y LTE TDD (con 7 configuraciones diferentes de la trama) en el software ICS Designer. Para estas redes se consideró un área de cobertura de aproximadamente 5 km² con 6 estaciones base ubicadas en los sitios que actualmente existen estaciones base. De estas simulaciones se extraen los siguientes resultados.
- ✓ De forma general, LTE FDD presenta mejor rendimiento de la red con respecto a LTE TDD. No obstante, LTE TDD puede ser beneficioso para servicios que requieran una asignación flexible de los recursos. La asignación de recursos en LTE TDD se basa en su configuración asimétrica, es decir, debido a las configuraciones diferentes de la trama tipo 2 es posible enfocar dichas configuraciones en servicios como la navegación web donde el tráfico es asimétrico.
- ✓ Las configuraciones de LTE TDD obtienen diferentes niveles de RSRP, RSRQ, SNIR, *throughput* y diferente área de cobertura de RSRP en comparación con LTE FDD. Sin embargo, con la configuración *DL-to-UL* número 5 de LTE TDD se obtiene un margen reducido de diferencia con respecto a LTE FDD. Esto muestra que en LTE TDD es posible conseguir altos niveles de *throughput* para el tráfico asimétrico a pesar de solo utilizar una banda de frecuencia, obteniendo mayor eficiencia en el uso del espectro.
- ✓ Con respecto a los niveles obtenidos de *throughput*, la red LTE FDD presenta valores máximos que superan los 56740 kbps para un solo usuario, en la red LTE TDD los valores de *throughput* máximo dependen de la asignación de recursos que programe el eNodeB. Por lo tanto, con LTE TDD es posible asignar recursos al usuario en función del *throughput* deseado y del tráfico asimétrico.
- ✓ En LTE TDD, para obtener niveles de RSRP, RSRQ, SNIR y *throughput* más cercanos a los que se obtiene en una red LTE FDD, es esencial asignar la mayor cantidad de símbolos OFDM del campo DwPTS de la subtrama especial de la trama tipo 2 de LTE a la transmisión en enlace descendente.

4.2. Recomendaciones

- ✓ Para llevar a cabo el análisis de una red LTE en el software ICS Designer se recomienda utilizar un mapa de alta resolución caso contrario se obtendrán resultados muy ideales con respecto al rendimiento real de una red.
- ✓ Se sugiere un estudio adicional en el que se evalúe la asignación de recursos a los canales de control, señales de sincronización tanto en LTE FDD como en LTE TDD.
- ✓ Se recomienda como tema de investigación el estudio del rendimiento de las redes LTE FDD y LTE TDD en enlace ascendente.
- ✓ En Ecuador existen redes LTE FDD, por lo que aún el espectro de TDD está disponible, lo que permite analizar la implementación de redes LTE TDD en el territorio nacional.
- ✓ Se recomienda en futuros trabajos analizar el uso de los diferentes esquemas múltiples de antenas en LTE TDD a fin de determinar cual de ellos obtiene mejores niveles de cobertura.
- ✓ Se sugiere el análisis del rendimiento de las redes LTE en escenarios reales mediante equipos de radiofrecuencia que soporten ambos tipos de duplexación, FDD y TDD.
- ✓ El diseño de transmisores y receptores en LTE TDD es un tema de análisis para trabajos posteriores, ya sea mediante software o implementación electrónica.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Wan, M. Zhou, y R. Wen, “Evolving LTE with Flexible Duplex”, *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 49–54, dic. 2013.
- [2] S. Stefania, T. Issam, y B. Matthew, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, 2a ed. United Kingdom: A John Wiley and Sons, Ltd., 2011.
- [3] A. Elnashar, M. A. El-Saidny, y M. R. Sherif, *Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks: A Practical Approach*, 1a ed. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2014.
- [4] F. Longoni, A. Lansisalmi, y A. Toskala, *WCDMA for UMTS - HSPA Evolution and LTE*, 4a ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
- [5] S. Chen, S. Sun, Y. Wang, G. Xiao, y R. Tamrakar, “A comprehensive survey of TDD-based mobile communication systems from TD-SCDMA 3G to TD-LTE(A) 4G and 5G directions”, *China Communications*, vol. 12, núm. 2, pp. 40–60, feb. 2015.
- [6] E. Dahlman, S. Parkvall, y J. Skold, *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, 1a ed. UK: Elsevier, 2011.
- [7] 3GPP, “Release 8”. [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>. [Consultado: 14-ago-2018].
- [8] C. Cox, *An introduction to LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G mobile communications*, 2a ed. UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
- [9] J. P. García, J. M. Molina García-Prado, y L. J. Liácer, *Sistemas de comunicaciones móviles: Segunda, tercera y cuarta generación*, 1a ed. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2014.
- [10] A. Z. Yonis, M. F. Ghanim, y M. F. Liew Abdullah, “LTE-FDD and LTE-TDD for Cellular Communications”, *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, pp. 1467–1471, 2012.
- [11] C. Gessner, A. Roessler, y M. Kottkamp, “UMTS Long Term Evolution (LTE) - Technology Introduction”, ROHDE&SCWARZ, Application Note, 2012.
- [12] I. Fernández López, “Planificación y dimensionado de una red LTE.”, Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Cataluña, 2014.
- [13] D. A. Verdugo Carpio, “Análisis de la capacidad de una portadora LTE en base a

- simulación y experimentación”, Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [14] J. T. J. Penttinen, *LTE / SAE Deployment Handbook*, 1a ed. United Kingdom: A John Wiley and Sons, Ltd., 2011.
- [15] R. León Sanz y R. Galán López, *Introducción a la movilidad: 4G/LTE y el desarrollo de aplicaciones Android*. Madrid: Dextra Editorial, 2014.
- [16] ETSI, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (3GPP TS 36.300 version 8.12.0 Release 8)”, ETSI TS 136 300, 2010.
- [17] J. E. Acuña y M. J. Terán, “Simulación en Matlab de los métodos de acceso OFDMA y SC-FDMA para la tecnología LTE sobre un canal inalámbrico AWGN y un canal multitrayectoria con distribución Nakagami”, Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [18] ETSI, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 8.9.0 Release 8)”, ETSI TS 136 211, 2010.
- [19] A. Perez, *LTE and LTE Advanced : 4G Network Radio Interface*, 1a ed. Great Britain and the United States: ISTE Ltd, John Wiley & Sons, Inc, 2015.
- [20] R. Agustí, F. Bernardo, F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez, y O. Sallent, *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Fundación Vodafone España, 2010.
- [21] Agilent Technologies, *LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges*, 2a ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, Incorporated, 2013.
- [22] ETSI, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 8.21.0 Release 8)”, ETSI TS 36 101, 2013.
- [23] E. A. Cruz López, “Evaluación de parámetros de handover en una red LTE mediante el software ICS-DESIGNER”, Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [24] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*, 4a ed. México: Pearson Education, Inc., 2003.
- [25] M. Trikha, N. Sharma, M. Singhal, R. Rajan, y P. Bhardwaj, “BER Performance Comparison between QPSK and 4-QA Modulation Schemes”, *MIT International*

- Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*, vol. 3, núm. 2, pp. 62–66, 2013.
- [26] H. Jiang y P. A. Wilford, “A Hierarchical Modulation for Upgrading Digital Broadcast Systems”, *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 51, núm. 2, pp. 223–229, jun. 2005.
- [27] T. I. Téllez García, “Despliegue de una red LTE en una zona rural al sureste de Madrid”, Proyecto fin de carrera, Carlos III de Madrid, 2013.
- [28] J. R. Hampton, *Introduction to MIMO Communications*, 1a ed. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [29] J. H. Amaya Valencia y J. E. Arevalo Peña, “MIMO multiantenna systems radiopropagation aspects”, en *2014 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 2014, pp. 1–6.
- [30] S. P. Guerrón y L. A. Romero, “Diseño y simulación de una red LTE (Long Term Evolution) para el norte de la ciudad de Quito mediante el software ICS Designer”, Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [31] ATDI, “Tutorial LTE Network Design with ICS Designer”. ATDI, 2012.
- [32] S. Chen, Y. Wang, W. Ma, y J. Chen, “Technical innovations promoting standard evolution: From TD-SCDMA to TD-LTE and beyond”, en *IEEE Wireless Communications*, 2012, vol. 19, pp. 60–66.
- [33] M. J. Shim, J. S. Han, H. J. Roh, y H. J. Choi, “A frequency synchronization method for 3GPP LTE OFDMA system in TDD mode”, *2009 9th International Symposium on Communications and Information Technology*, pp. 864–868, 2009.
- [34] S. Rathi, N. Malik, N. Chahal, y S. Malik, “Throughput for TDD and FDD 4G LTE Systems”, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 3, núm. 12, pp. 73–77, 2014.
- [35] L. Ahmed y M. Abdullah, “The Impact of LTE-FDD at the LTE-TDD for the Co-Existence under 2.6 GHz Band for Malaysia”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 2, núm. 3, pp. 657–667, 2016.
- [36] ETSI, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer - Measurements (3GPP TS 36.214 version 8.7.0 Release 8)”, ETSI TS 136 214, 2009.
- [37] F. Afroz, R. Subramanian, R. Heidary, K. Sandrasegaran, y S. Ahmed, “SINR, RSRP,

- RSSI and RSRQ Measurements in Long Term Evolution Networks”, *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, vol. 7, núm. 4, pp. 113–123, 2015.
- [38] M. La Rocca, “RSRQ to SINR Relation”, *laroccasolutions*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.laroccasolutions.com/164-rsrq-to-sinr/>. [Consultado: 15-feb-2018].
- [39] ATDI, “Free map download”. [En línea]. Disponible en: <http://www.atdi.com/cartography/#mg>. [Consultado: 23-ene-2018].
- [40] J.-P. Noël y E. Grenier, “Mixed absorption-diffraction propagation models for wireless proximity networks”. ATDI, 2004.
- [41] E. Del Río Ruiz, “Sistemas de telefonía móvil”, en *Sistemas de telefonía fija y móvil*, 1a ed., Paraninfo SA., 2018, pp. 205–206.
- [42] HUAWEI TECHNOLOGIES, “RRU3971 Description”, Datasheet, 2015.
- [43] A. Sendín Escalona, *Fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles: evolución y tecnologías*, 1a ed. Madrid: McGraw-Hill, 2004.
- [44] Powerwave, “Triple Broadband Antenna”, 824-960/2x1710-2170 MHz datasheet, 2005.
- [45] J. Brown y J. Y. Khan, “Key performance aspects of an LTE FDD based Smart Grid communications network”, *Computer Communications*, vol. 36, núm. 5, pp. 551–561, 2013.
- [46] ETSI, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (3GPP TR 36.942 version 8.4.0 Release 8)”, ETSI TR 136 942, 2012.
- [47] J. Fuertes y N. Molina, “Análisis de métricas basado en esquemas de reuso fraccional de frecuencias y planificación de tráfico en ambientes de macro-femto celdas en la tecnología LTE.”, Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [48] Telesystem Innovations Inc., “LTE in a Nutshell: The Physical Layer”. 2010.
- [49] J. P. García, J. M. Molina García-Pardo, y L. J. Llácer, *Sistemas de comunicaciones móviles: caracterización del canal móvil*, 1a ed. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2014.
- [50] G. De la Roche, A. Alayón-Glazunov, y B. Allen, *LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks: Channel Modelling and Propagation*, 1a ed. New York: John

Wiley & Sons, Incorporated, 2012.

- [51] ICS TELECOM, “Radio propagation in ICS Telecom”. ATDI.
- [52] ITU-R, “Monte Carlo simulation methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems”, Report ITU-R SM.2028-2, 2017.
- [53] S. Parkvall, A. Furuskär, y E. Dahlman, “Evolution of LTE toward IMT-advanced”, en *IEEE Communications Magazine*, 2011, vol. 49, núm. 2, pp. 84–91.
- [54] J. Rodriguez, “Manual de capacitación avanzado”. ATDI.
- [55] ATDI UK, “LTE modelling”, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=QzadSixVzZY&t=1969s>. [Consultado: 07-sep-2018].
- [56] “LTE resource grid”. [En línea]. Disponible en: http://niviuk.free.fr/lte_resource_grid.html. [Consultado: 05-nov-2018].

6. ANEXOS

ANEXO I: Hoja de datos del RRU 3971 (Anexo digital)

ANEXO II: Hoja de datos de la Antena 824-960/2x1710-2170 MHz

ANEXO III: Manual de Usuario (Anexo digital)

ANEXO IV: Resultados de Simulación (Anexo digital)

ANEXO II. Hoja de datos de la Antena 824-960/2x1710-2170 MHz

Triple Broadband Antenna

65° 1.4 m MET Antenna

824-960/2x1710-2170 MHz

Part Number: 7780.00 | Horizontal Beamwidth: 65° Gain: 14.5 / 14.8 dBi | Electrical Downtilt: Adjustable Connector Type: 7/16 female

The triple band solution from Powerwave offers a flexible antenna option for operators seeking excellent RF-performance as well as fast and successful roll-out of their next-generation networks. Designed to overcome UMTS deployment challenges, such as space and installation issues as well as those of co-siting in demanding radio environments, these antennas include the Powerwave patented Manually-adjustable Electrical Tilt (MET) function, which offers operators flexibility in tuning antenna systems as well as logistical advantages. The Powerwave Triband antenna design is based on a patented stacked aperture-coupled patch technology for GSM 900-, GSM1800- and UMTS 2100 MHz-bands. Finally, the advanced reflector and element structure in combination with a superior feeding network minimizes the weight and maximizes the overall performance of the antenna.



Mechanical Specifications

Connector type (6 pcs)	7/16 female
Connector position	Bottom
Dimensions, HxWxD	1400 x 280 x 125mm (4' 7"x 11"x 5")
Weight, excluding brackets	15kg (33lbs)
Weight, including brackets	3.5kg
Wind load, frontal, 150 km/h, Cd=1, (N)	428
Operating wind speed (m/s)	55
Survival wind speed (m/s)	70
Weatherproofing	According to T1102
Radome material	GRP
Radome colour	RAL 7035 on all visible plastic parts
Packing size HxWxD (mm)	1650 x 355 x 200mm (5' 5"x1' 2"x 8")
Shipping weight including bracket kit	20kg (44lbs)
Mounting	Pre-mounted standard brackets

ANTENNA SYSTEMS

BASE STATION SYSTEMS

COVERAGE SYSTEMS

THE POWER IN WIRELESS®

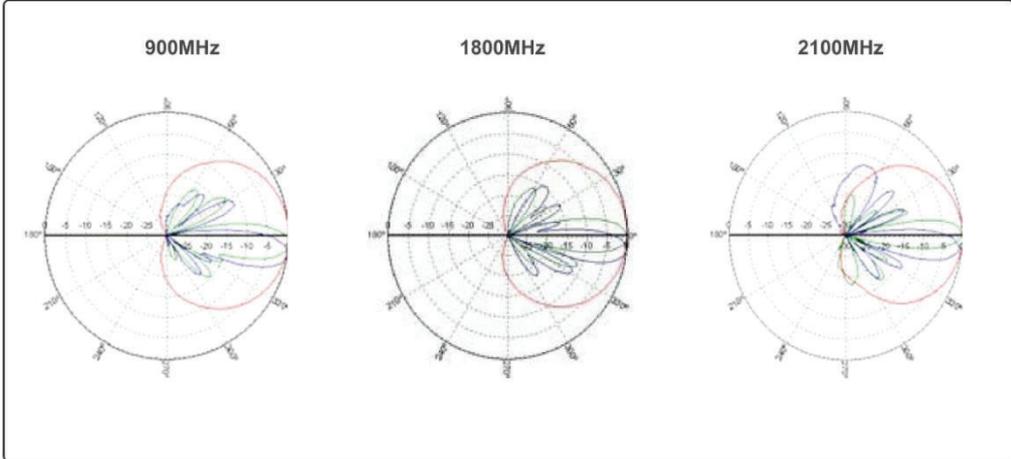
 **Powerwave**
technologies

824-960/2x1710-2170 MHz

Triple Broadband Antenna

Electrical Specifications			
Frequency band, MHz	824-960	1710-1880	1900-2170
Gain ± 0.5(dBi)	14.5	14.4	14.8
Polarization	dual linear ±45°	dual linear ±45°	dual linear ±45°
Nominal impedance (W)	50	50	50
VSWR, 824-960 MHz	1.5:1		
VSWR, 1710-1880 MHz		1.5:1	
VSWR, 1900-2025MHz			1.5:1
VSWR, 2110-2170MHz			1.5:1
Isolation between inputs (dB), 824-960 MHz	30		
Isolation between inputs (dB), 1710-1880 MHz		30	
Isolation between inputs (dB), 1900-2025 MHz			>30
Isolation between inputs (dB), 2110-2170 MHz			>30
Inter band isolation, all bands (dB)		38	
Horizontal -3dB beam width	68° ± 5°	65° ± 5°	62° ± 5°
Tracking, Horizontal plane, 824-896 MHz, ±60°	<2.0dB		
Tracking, Horizontal plane, 880-960 MHz, ±60°	<2.0dB		
Tracking, Horizontal plane, 1710-1880 MHz, ±60°		<1.5dB	
Tracking, Horizontal plane, 1900-2025 MHz, ±60°			<1.5dB
Tracking, Horizontal plane, 2110-2170 MHz, ±60°			<1.5dB
Electrical down tilt range (adjustable)	2° to 12°	0° to 12°	0° to 12°
Vertical Beam width -3dB MHz	14°±2°	14°±1°	13°±1°
Side lobe suppression, Vertical 1stupper (dB)	>17, 16, 15, 14 X= 2, 4, 8, 12° MET	>17, 16, 15, 14 X=0, 4, 8, 12° MET	>17, 16, 15, 14 X=0, 4, 8, 12° MET
Side lobe suppression, Vertical Upper (dB)	>10	>10	>10
Vertical beam squint	1°	1°	1°
Front-to-back Ratio (dB)	>28	>30	>30
Front-to-back Ratio, Total Power (dB)	>25	>25	>25
Cross-polar discrimination (XPD) ±60° (dB)	>11	>11	>10
IM3, 2Tx@43dBm (dBm) (dBc)	-153		
IM3, 2Tx@43dBm (dBm) (dBc)		-153	
IM7, 2Tx@43dBm (dBm) (dBc)			-160
Power Handling, Average per input (W)	300	250	250
Power Handling, Average total (W)	600	500	500

All specifications are subject to change without notice. Contact your Powerwave representative for complete performance data.



<p>Corporate Headquarters Powerwave Technologies, Inc. 1801 East St. Andrew Place Santa Ana, CA 92705 USA</p>	<p>Tel: 714-466-1000 Fax: 714-466-5800 www.powerwave.com</p>	<p>Main European Office Antennvägen 6 SE-187 80 Täby Sweden Tel: +46 8 540 822 00 Fax: +46 8 540 823 40</p>	<p>Main Asia Pacific Office 23 F Tai Yau Building 181 Johnston Road Wanchai, Hong Kong Tel: +852 2512 6123 Fax: +852 2575 4860</p>	
---	---	---	--	--

©Copyright March 2005, Powerwave Technologies, Inc. All Rights reserved. Powerwave, Powerwave Technologies, The Power in Wireless and the Powerwave logo are registered trademarks of Powerwave Technologies, Inc.

COVERAGE AND CAPACITY	TECHNOLOGY LEADERSHIP	GLOBAL PARTNER	INTEGRATED SOLUTIONS	QUALITY AND RELIABILITY
-----------------------	-----------------------	----------------	----------------------	-------------------------

D0031-08210 Rev A

ORDEN DE EMPASTADO