

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

AMPLIACIÓN Y OPTIMIZACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN DE LA RED LTE DE LA CIUDAD DE IBARRA PERTENECIENTE A UNA OPERADORA LOCAL

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

BAYARDO PATRICIO YÉPEZ IBARRA

DIRECTOR: Dra. DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ

Quito, abril 2021

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Bayardo Patricio Yépez Ibarra, bajo mi supervisión.

Dra. DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Bayardo Patricio Yépez Ibarra, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado 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 dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Bayardo Patricio Yépez Ibarra.

DEDICATORIA

A mis padres y en memoria de mis abuelitos.

AGRADECIMIENTO

A mis queridos padres por su cariño incondicional, por sus consejos y por saber guiarme siempre de la mejor manera a lo largo de toda mi vida.

A mis amigos, con quienes he compartido muchos momentos en la vida universitaria.

Al MSc. Andrés Reyes por su guía durante la realización del Trabajo de Titulación. Gracias por permitirme alcanzar esta meta tan anhelada.

A la Dra. Diana Navarro por la paciencia y el apoyo brindado durante la elaboración de este Trabajo de Titulación y también por las facilidades brindadas en el Laboratorio de Investigación y Simulación del DETRI.

A la Ing. Vilma Morejón y el Ing. Roberto Marcillo por proporcionarme la información necesaria para la realización de este Trabajo de Titulación.

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.....	3
1.3.1 <i>Long Term Evolution</i>	3
1.3.2 Arquitectura LTE	4
1.3.3 Flujo de Datos y Pila de Protocolos	8
1.3.4 Capa Física	15
2. METODOLOGÍA.....	21
2.1. Parámetros de rendimiento en LTE	21
2.1.1. <i>Reference Signal Received Power (RSRP)</i>	21
2.1.2. <i>Reference Signal Received Quality (RSRQ)</i>	22
2.1.3. <i>Signal to Noise plus Interference Ratio (SNIR)</i>	22
2.2. Simulación de una red LTE en ICS-Designer.....	23
2.2.1. Área de Cobertura	23
2.2.2. Cartografía	24
2.2.3. Ubicación de las Radio bases.....	25
2.2.4. Parámetros del eNodeB	27
2.2.5. Parámetros del equipo de usuario	31
2.3. Modelos de propagación y geometría de difracción	32
2.3.1. Modelo 3GPP LTE urban.....	32
2.3.2. Método Deygout 94	33
2.3.3. Selección del modelo de propagación en ICS-Designer	33
2.3.4. Parámetros de <i>clutter</i>	34
2.4. Ampliación y optimización de la red LTE.....	35

2.4.1.	Creación de nuevas radiobases	35
2.4.2.	Optimización.....	35
2.5.	Herramientas de simulación	36
2.5.1.	Tx/Rx <i>Field Strength</i> (FS).....	36
2.5.2.	SNIR <i>maps</i>	36
2.5.3.	RSRQ <i>maps</i>	37
2.5.4.	<i>Throughput map</i>	38
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1.	Análisis de la red inicial	39
3.1.1.	Análisis del parámetro RSRP	39
3.1.2.	Análisis del parámetro SNIR.....	40
3.1.3.	Análisis del parámetro <i>Throughput</i>	41
3.1.4.	Análisis del parámetro RSRQ	42
3.2.	Ampliación y Optimización de la Red	43
3.2.1.	Ampliación de la Red LTE	44
3.2.2.	Optimización de la Red LTE	45
3.3.	Comparación de la red ampliada y optimizada respecto a la red inicial ..	46
3.3.1.	Resultado de la optimización del parámetro RSRP.....	47
3.3.2.	Resultado de la optimización del parámetro SNIR.....	48
3.3.3.	Resultado de la optimización del parámetro <i>Throughput</i>	50
3.3.4.	Resultado de la optimización del parámetro RSRQ	52
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
4.1.	CONCLUSIONES.....	54
4.2.	RECOMENDACIONES	55
5.	Referencias.....	57
	ANEXOS	61

RESUMEN

El presente trabajo de titulación se enfoca en la simulación de la red LTE de la ciudad de Ibarra perteneciente a una operadora local con el fin de presentar una solución de ampliación y optimización. Para la simulación de la red se empleará el software de planificación y diseño de redes inalámbricas *ICS-Designer*.

En el primer capítulo, se presenta una revisión de la tecnología LTE, teniendo en cuenta las características y especificaciones que la convierten en una tecnología enfocada al servicio de datos.

En el segundo capítulo, se presenta una breve descripción del software utilizado para la simulación de la red, así como el proceso requerido para estructurar la red LTE dentro del mismo. En primer lugar, se establece el perímetro actual de la ciudad como área de simulación. A continuación, se ubican las radiobases y se configuran los elementos de cada una en base a la información de la operadora local. Con los mapas de cobertura obtenidos se realiza un análisis de los parámetros como el SNIR, RSRP, RSRQ y *Throughput* de la red inicial.

En el tercer capítulo, se presenta la simulación de la red LTE luego de haber modificado la configuración de las radiobases y añadido nuevas radiobases con la finalidad de expandir y optimizar la red para mejorar los niveles de cobertura y cubrir zonas de sombra.

Finalmente, en el cuarto capítulo, se presentan las conclusiones y recomendaciones fundamentadas en la comparación de las simulaciones de la red inicial y la red ampliada y optimizada.

PALABRAS CLAVE: Ampliación, optimización, LTE, RSRP, RSRQ, Throughput

ABSTRACT

This degree work focuses on the simulation of the LTE network of the city of Ibarra belonging to a local operator to present an expansion and optimization solution. The wireless network planning and design software ICS-Designer will be used to simulate the network.

The first chapter refers to a review of LTE and the characteristics and specifications that make it a technology focused on data service.

The second chapter details a brief description of the software used for network simulation and the process required to structure the LTE network. The first stage will consist to establish the current perimeter of the city as a simulation area. All the parameters of the base stations specified by the local operator will be configured into the software. With the coverage maps will make an analysis of the parameters such as SNIR, RSRP, RSRQ and Throughput of the initial network.

The third chapter contains the simulation of the LTE network after having modified the configuration of the base stations and added new base stations to expand and optimize the network to improve coverage levels and cover shadow areas.

Finally, the fourth chapter present the conclusions and recommendations based on the comparison of the simulations of the initial network and the extended and optimized network.

KEYWORDS: Expansion, optimization, LTE, RSRP, RSRQ, Throughput

1. INTRODUCCIÓN

Long Term Evolution (LTE) es un estándar de comunicaciones celulares ampliamente adoptado e implementado en todo el mundo. Ofrece servicios inalámbricos de alta velocidad para satisfacer la creciente demanda del tráfico de datos del usuario.

En los últimos años, la demanda de tráfico de datos en redes celulares ha crecido enormemente debido a la popularidad de los dispositivos portátiles inteligentes. Estos dispositivos ofrecen una amplia variedad de aplicaciones que requieren un alto throughput de datos, como transmisión de video y audio, videoconferencia y juegos interactivos. Por tal razón los usuarios tienen la necesidad de estar conectados en cualquier lugar en todo momento haciendo que las operadoras de telefonía móvil se planteen una expansión de la red LTE para optimizar sus recursos con el objetivo de garantizar una cobertura excelente y servicios de alta calidad.

A pesar de que la ciudad de Ibarra cuenta con una red LTE desplegada desde hace algunos años atrás, debido al aumento de la población y por ende del perímetro urbano de la ciudad se ha provocado que en las zonas periféricas de la ciudad no se tenga una buena cobertura LTE o inclusive se cuente solo con una cobertura UMTS proveniente de radiobases ubicadas en sectores alejados de la ciudad.

En el presente trabajo de titulación, se realiza la simulación de la red LTE desplegada y en funcionamiento de la ciudad de Ibarra usando el software de planificación y diseño de redes inalámbricas ICS-Designer; con el fin de analizar su rendimiento y proponer la creación de nuevas radiobases para aumentar el alcance de la red y también presentar una solución de optimización para mejorar sus parámetros de cobertura y calidad.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es: ampliar y optimizar mediante simulación la red LTE de la ciudad de Ibarra perteneciente a una operadora local.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Realizar una revisión de los conceptos de la tecnología LTE, enfocado al servicio de datos.
- Simular el estado inicial de la red LTE de la ciudad de Ibarra de una operadora local.

- Establecer las acciones a realizarse con el fin de ampliar la red LTE y optimizar sus parámetros de rendimiento.
- Realizar la simulación de la red ampliada y optimizada con el software ICS-Designer.
- Realizar la comparación de resultados entre las simulaciones de la red inicial y la red ampliada y optimizada.

1.2 ALCANCE

Se realizará la simulación de la red LTE de la ciudad de Ibarra perteneciente a una operadora local, para lo cual se tendrá en cuenta el perímetro actual de la ciudad como se aprecia en la Figura 1.1 y se hará uso del software ICS-Designer.



Figura 1.1. Área de la ciudad a ser simulada

A partir de los datos como la ubicación geográfica y configuración de las radiobases de la empresa CNT E.P., mediante la simulación se establecerán los parámetros SNIR (Signal to Interference and Noise Ratio), RSRP (Reference Signal Received Power), RSRQ (Reference Signal Received Quality) y Throughput iniciales de la red y se identificarán las zonas sin cobertura.

También se realizarán acciones como reajustar la configuración de los parámetros (altura, azimuth, tilt, etc) de cada uno de los elementos de las radiobases, además se propondrán nuevos sitios, con el objetivo de ampliar y optimizar la red para que alcance adecuados niveles de cobertura en toda la ciudad, incluyendo las zonas que se han poblado en la periferia.

El análisis de los parámetros SNIR, RSRP, RSRQ y Throughput además del de las zonas de sombra de la simulación de optimización, se compararán con los resultados obtenidos, analizando los mapas de cobertura, gráficos estadísticos y demás parámetros para comprobar el mejoramiento de la cobertura y capacidad de la red LTE luego de haber sido expandida y optimizada.

1.3 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una descripción de la teoría relacionada con el desarrollo de este trabajo de titulación. Se realizará una revisión de la tecnología LTE.

1.3.1 Long Term Evolution

LTE es una tecnología de comunicación celular definida por 3GPP en el *Release 8*, también conocida como 4G, la cual resulta ser la más competitiva hoy en día y en los próximos años. Esta tecnología ofrece altas velocidades de transmisión de datos con baja latencia, mejora en los servicios, reducción de costos y permite mejor utilización del espectro gracias a la flexibilidad en frecuencia y ancho de banda [1].

Requerimientos de la tecnología LTE

Las principales características y requisitos, para garantizar la competitividad de la tecnología LTE, establecidos por el 3GPP y plasmados en las especificaciones del *Release 8* se detallan a continuación:

- **Aumento de la velocidad de datos:** La velocidad máxima de datos se determina como el mayor rendimiento que un usuario puede alcanzar, asignándole a dicho usuario el más alto esquema de codificación y modulación haciendo uso de todo el

ancho de banda disponible como también el número máximo de antenas admitidas. Las velocidades de 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el enlace ascendente son el objetivo de la tecnología LTE detalladas en *Release 8* [2].

- **Reducción de la configuración y latencia de transferencia:** LTE también se requiere para poder operar en el plano de control con una latencia de transición del estado idle (inactivo), con la dirección IP (Protocolo de internet) asignada, al estado conectado debe ser inferior a 50 ms; incluyendo el establecimiento del plano de usuario y excluyendo el retardo de transferencia de la interfaz S1. El objetivo para la transición de un estado dormant (latente) al modo conectado, es decir, el subestado DRX (recepción discontinua) en modo conectad debe ser inferior a 10 ms [2]. De la misma forma en el plano de usuario la latencia debe ser menor a 10 ms [3].
- **Eficiencia espectral mejorada:** Las eficiencias espectrales correspondientes a la velocidad de datos revisadas anteriormente son de 5 y 2.5 bps/Hz respectivamente. Teniendo en cuenta la suposición de que el terminal tiene dos antenas de recepción y una antena de transmisión, mientras que la primera versión de las especificaciones LTE fue diseñada para admitir la operación MIMO de enlace descendente con hasta cuatro antenas de transmisión y recepción [2].
- **Flexibilidad en el uso del espectro y soporte para varios anchos de banda:** LTE permite utilizar anchos de banda de 20, 15, 10, 5 MHz e inclusive se puede usar anchos de banda menores para tamaños de celda más escalables [3].
- **Movilidad y rangos de celda:** La tecnología LTE puede soportar la comunicación con terminales que se mueven a velocidades de hasta 350 km/h, o incluso hasta 500 km/h, dependiendo de la banda de frecuencia. El sistema LTE debe alcanzar estos objetivos en celdas típicas de radio de hasta 5 km, mientras que la comunicación debe continuar siendo posible para rangos de celdas mayores, para permitir despliegues de área amplia [4].

1.3.2 Arquitectura LTE

La red LTE está conformada de dos partes principales, la primera es la red de acceso de radio llamada *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) y la red troncal conocida como *Evolved Packet Core* (EPC). EPC se ocupa principalmente de las funciones de gestión de sesión y movilidad, mientras que E-UTRAN se enfoca más a la

función de transmisión de radio. Las radio bases en E-UTRAN se denominan *Evolved Node B* (eNB) [5] [6]. En la Figura 1.2 se muestra la arquitectura de red LTE.

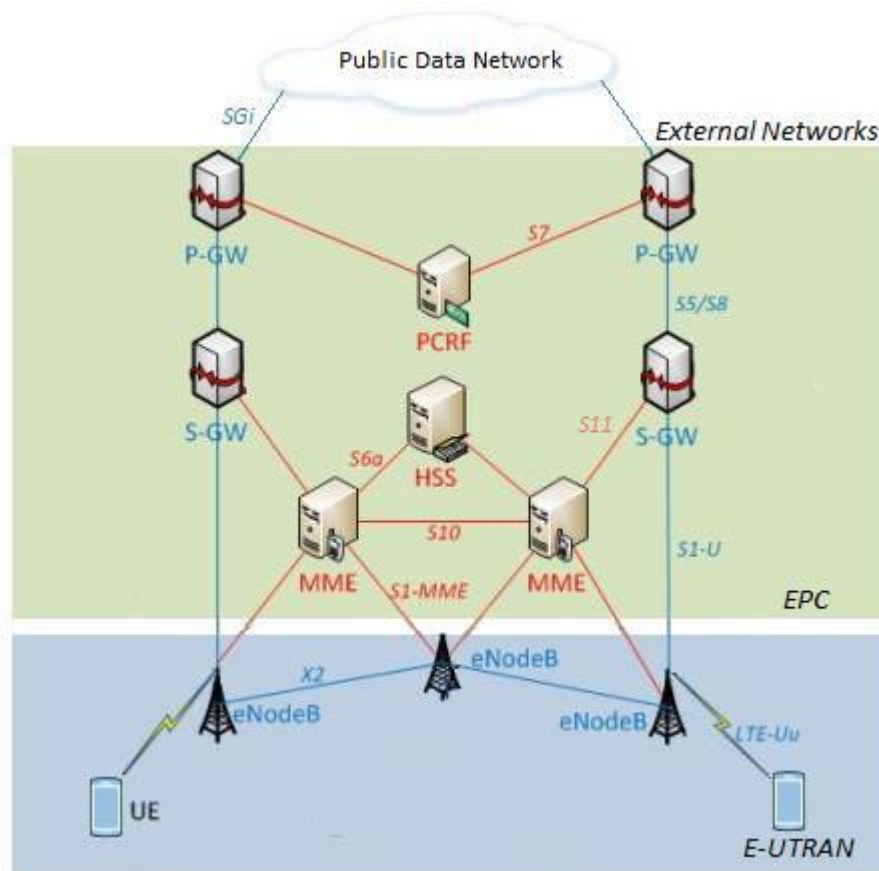


Figura 1.2. Arquitectura LTE

a) User Equipment (UE)

Como indica su nombre, el UE es todo dispositivo que posea el usuario final con el que pueda comunicarse con las radio bases (eNodeBs) del E-UTRAN utilizando la tecnología LTE. En la era de la banda ancha móvil, el teléfono celular común es solo uno de los muchos dispositivos que aprovechan los servicios de datos móviles. Los teléfonos inteligentes, tablets, laptops, netbooks, dongles y dispositivos de medición inteligente son solo algunos de los dispositivos que actualmente se encuentran en el mercado que están equipados con radios LTE [7].

b) Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)

La red de acceso en LTE o conocida bajo las siglas E-UTRAN, se encuentra conformada tan solo por varios eNodeBs los que forman una red dentro de toda el área de cobertura. Cada eNodeB es una estación o también conocida como radio base la que se encarga de

controlar las funciones de radio, permitiendo a la parte fija del sistema conectarse con el UE [8].

La E-UTRAN es responsable de todas las funciones relacionadas con la radio, que se pueden resumir brevemente como:

- **Gestión de recursos de radio:** Esto cubre todas las funciones relacionadas con los portadores de radio, como el control de portador de radio, el control de admisión de radio, el control de movilidad de radio, la programación y la asignación dinámica de recursos a los UE tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente.
- **Compresión del encabezado:** Esto ayuda a garantizar un uso eficiente de la interfaz de radio al comprimir los encabezados de los paquetes IP que de otro modo podrían representar una sobrecarga significativa, especialmente para paquetes pequeños como VoIP.
- **Seguridad:** Todos los datos enviados a través de la interfaz de radio están encriptados.
- **Posicionamiento:** La E-UTRAN proporciona las mediciones necesarias y otros datos al E-SMLC y ayuda al E-SMLC a encontrar la posición del UE.
- **Conectividad al EPC:** Esto consiste en la señalización hacia el MME y el camino del portador hacia el S-GW [2].

eNodeB (eNB)

Los eNodeBs son las estaciones base que componen la E-UTRAN y proporcionan conectividad inalámbrica para el UE. El término estación base se lo utiliza de forma libre y puede hacer referencia a cualquier número de escenarios de despliegue celular. Por ejemplo, el despliegue de un sitio común que consta de tres sectores y cubre tres áreas celulares que comprenden el mismo eNodeB [9].

c) Evolved Packet Core (EPC)

El núcleo de red o también conocido como red troncal, está encargada de controlar el acceso a la red celular, autenticar a los usuarios, gestionar la movilidad de los usuarios, implementar mecanismos para la interconexión con otras redes y también controlar los servicios ofertados al usuario final [8]. Entre sus principales nodos lógicos se encuentran:

- **Mobility Management Entity (MME)**

La MME utiliza mensajes de señalización para el soporte de movilidad entre EPS y otras redes externas, también gestiona la movilidad de los usuarios en estado *idle* y el control de portadores EPS (*EPS Bearer Control*) [10]. La MME se encarga también de ayudar a rastrear la ubicación del usuario en forma de seguridad y varios procedimientos de *paging* [11].

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

S-GW actúa como un enrutador al reenviar datos entre la red de acceso de radio y la puerta de enlace PDN (P-GW). También sirve como un ancla de movilidad para funcionar con otras tecnologías como GSM y UMTS [10]. Sirve como el ancla de movilidad local cuando el UE se encuentra en estado *idle*. Ayuda a mantener información sobre el volumen de datos enviados o recibidos en forma de cargos en la red visitante. La MME utiliza la información guardada por el S-GW para restablecer un UE en estado *idle* durante el restablecimiento del UE durante el enlace descendente [2].

- **PDN Gateway (P-GW)**

P-GW se comunica con el mundo exterior mediante la interfaz SGi. Desempeña un papel importante en la asignación de direcciones IP a varios UEs y ayuda al EPC a aplicar el QoS requerido a los tráficos individuales según el informe de la PCRF en el lado del enlace descendente mediante el filtrado de IP. Debido a la sensibilidad de los portadores de GBR, P-GW ayuda a hacer cumplir su QoS requerido y sirve como base para que otras tecnologías no 3GPP coexistan con LTE [2] [10].

- **Home Subscriber Server (HSS)**

HSS sirve como el servidor de base de datos central para LTE que contiene información relacionada con la identidad y la suscripción para los usuarios domésticos. HSS realiza la misma función que el HLR en las tecnologías 3G [11].

- **Policy and Charging Rules Function (PCRF)**

PCRF realiza tres funciones vitales. Estos son la vigilancia, la toma de decisiones para el EPC y el control de las funcionalidades de carga basadas en el flujo de datos [11]. PCRF también es responsable del control de QoS de UE e informa al P-GW y al S-GW [12].

d) Interfaces de la arquitectura

Con la finalidad de que capas y planos sean lógicamente independientes, la tecnología LTE, hace uso de varios interfaces y protocolos [8].

- **Uu:** es la interfaz de radio entre UE y eNB.
- **S1-U:** es la parte del interfaz S1 que conecta el UE al EPC (S-GW) en el plano del usuario.
- **X2:** interconecta los eNBs entre ellos directamente para el intercambio de mensajes de señalización, así como también colaborar en la administración de los recursos de radio y utiliza los mismos protocolos que la interfaz S1.
- **S1-MME:** conecta el UE al EPC (S-GW) brindando soporte en el plano de control.
- **S10:** interconecta a los MMEs para transferencia de información y relocalización del UE.
- **S11:** interconecta la MME y el S-GW.
- **S6a:** interconecta la MME y el HSS.
- **S5:** interconecta el S-GW y el P-GW.
- **S7:** interconecta P-GW con PCRF.
- **SGi:** interconecta PCRF y la red de paquetes externa [13].

1.3.3 Flujo de Datos y Pila de Protocolos

La información en esta arquitectura está totalmente basada en IP y, en consecuencia, está estructurada en paquetes. Estos paquetes tienen tamaños variables y diferentes tasas de transmisión. Los diferentes elementos de la arquitectura tienen que establecer una conexión entre ellos y también con el mundo externo, asegurando al mismo tiempo la integridad de la información [13].

a) Protocolos de las Capas

La pila de protocolos son ciertos módulos de software encargados de tareas específicas en el proceso de establecimiento de conexión y manejo de mensajes. En la Figura 1.3 se aprecia los protocolos que se ejecutan en cada capa.

Antes de que los datos del usuario sean enviados directamente a través del sistema inalámbrico. Se debe gestionar mediante varios mensajes de control que permiten que el

UE se conecte correctamente a la red inalámbrica. Debido a la variabilidad del medio inalámbrico, se debe verificar la integridad de los datos. Esperar que la corrección de datos sea realizada por capas superiores tardaría demasiado para ser aceptable, por lo que cada una de las capas debe proporcionar sus propias pruebas de integridad y corrección de datos. Esto se realiza mediante un stack de protocolos al permitir que cada capa sea responsable de funciones específicas [2] [13].

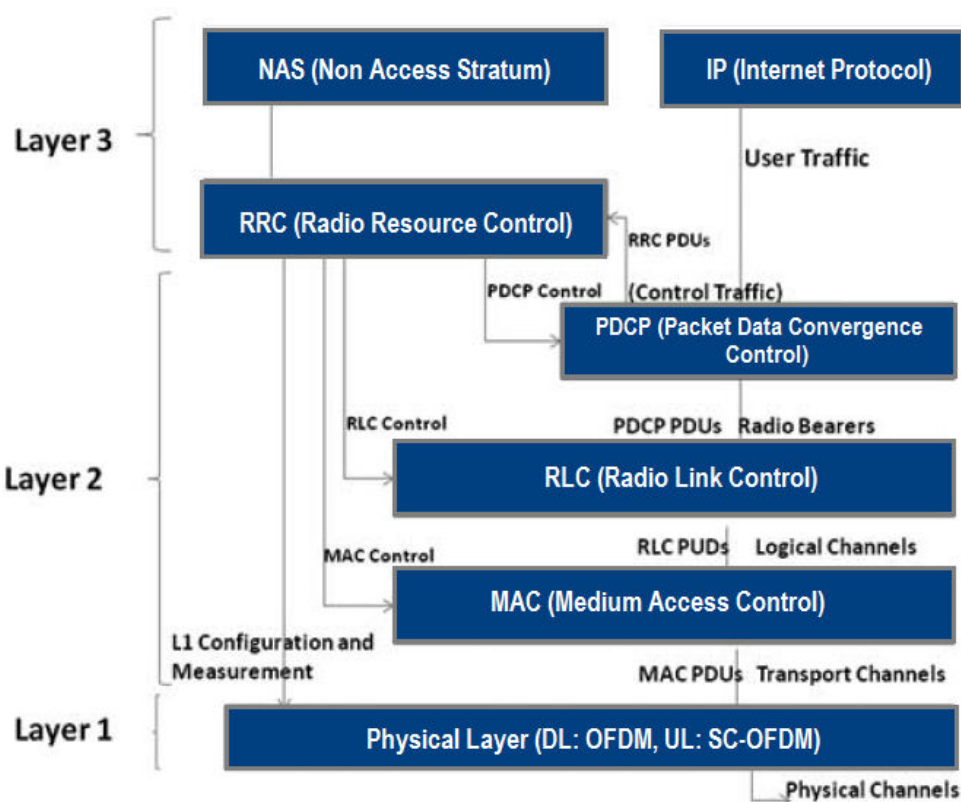


Figura 1.3. Pila de Protocolos en E-UTRAN

Radio Resource Management (RRM)

RRM se basa en varias técnicas y procedimientos, que incluyen control de potencia, programación, búsqueda de celda, reelección de celdas, transferencia, monitoreo de enlaces de radio o conexiones, establecimiento y restablecimiento de conexiones. Las funciones avanzadas como la gestión de interferencias, los servicios de ubicación y algunos métodos de planificación de red utilizan técnicas relacionadas con RRM basadas en el enlace de radio mediante mediciones realizadas por el UE o eNodeB [2].

Radio Link Protocol (RLC)

El RLC tiene tres modos de funcionamiento. Estos son Transport Mode (TM), Acknowledged Mode (AM) y Un-acknowledged Mode (UM). Solo en AM se usa ARQ (Automatic Repeat Request) para la transferencia de datos en PDU (Protocol Data Unit) de capa superior y correcciones de errores. En UM y AM, también realiza concatenación, reensamblado y segmentación de SDUs (Service Data Units). El TM es un rango entre las SDUs RLC y las PDUs RLC. Es responsable de la información del sistema de broadcast y el control de mensajes de paging. El AM proporciona datos de forma bidireccional siempre que RLC transmite, tanto en el enlace ascendente como el enlace descendente. También es responsable de enviar la confirmación en aplicaciones sensibles a retardos que no son en tiempo real, como la navegación web. Por otro parte, el UM realiza la distribución y continuidad de las SDUs RLC y la reordenación de las PDUs RLC en los tráficos en tiempo real como VoIP [14] [15].

Radio Resource Control (RRC)

Esta capa se encuentra solo en el plano de control. Entre sus funciones se encuentran transmitir y recibir mensajes NAS, activación de la seguridad inicial, brindar soporte paging y a las mediciones. RRC en cuanto a seguridad se encarga de la gestión de claves, configuración, establecimiento, mantenimiento y liberación de portadores de radio P2P [14].

Packet Data Convergence Protocol (PDCP)

Esta capa se encarga de la compresión y descompresión del encabezado de los datos IP, la transferencia de datos en el plano de usuario o en el plano de control, el mantenimiento de los números de secuencia (SN) PDCP, la entrega en secuencia de las PDU de la capa superior para el restablecimiento en las capas inferiores, cifrado y descifrado de datos de plano de usuario y datos de plano de control, protección y verificación de integridad de datos del plano de control, descarte basado en temporizador, descarte de paquetes duplicados, PDCP se utiliza para SRB y DRB mapeados en canales lógicos como DCCH (Dedicated Control Channel) y DTCH (Dedicated Traffic Channel) [16].

Non Access Stratum (NAS)

Conforma el estrato más del plano de control el mismo que se ejecuta entre el UE y la MME. Los protocolos NAS brindan soporte a la movilidad del UE así como a los procedimientos de gestión de sesión para que se pueda establecer y mantener la conexión IP entre el UE y un P-GW [14] [15].

Medium Access Protocol (MAC)

MAC es una capa fundamental en LTE siendo parte de la capa lógica que es responsable de la asignación de información entre los canales lógicos y de transporte. Además, se encarga de multiplexar las PDUs MAC a la capa física y también recibe SDUs de la capa física por medio del canal de transporte y la conexión lógica entre la capa RLC y el canal lógico [2]. Las funciones más importantes que la capa MAC debe realizar son la corrección de errores utilizando HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), la programación y el manejo de prioridades de las aplicaciones en el canal lógico de cada UE y la priorización del canal lógico [14].

b) Portadoras de los Mensajes

En LTE todos los datos del usuario están basados en IP. Cuando un usuario está conectado a una PDN (Public Data Network) externa, la conexión que se establece a través de la red LTE se mantiene siempre activa, hasta que el usuario se desconecta de la PDN. La portadora es una ruta de transmisión de información de capacidad definida, retardo, tasa de error de bits, etc. La definición de portadora se da a nivel de red. Representa una asociación lógica entre un UE y una PDN.

La portadora se encarga de transportar información con cierto QoS asociado, que define las características de calidad del servicio. Las direcciones temporales se asocian a cada portadora para indicar el origen y el destino de los datos [13].

Quality of Service (QoS)

Las posibles QoS asociadas a una portadora se especifican mediante nueve QCI (QoS Class Identifier). Se clasifican según dos tipos de recursos GBR (Guaranteed Bit Rate) y Non-GBR (non-Guaranteed Bit Rate), como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Categorías de QCI

QCI	Tipo de Recurso	Prioridad	Retraso de paquetes (ms)	Tasa de pérdida de paquetes	Ejemplo de servicio
1	GBR	2	100	10^{-2}	Llamada de voz
2	GBR	4	150	10^{-3}	Videoconferencia
3	GBR	5	300	10^{-6}	Video
4	GBR	3	50	10^{-3}	Juegos en tiempo real
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	Señalización IMS
6	Non-GBR	7	100	10^{-3}	Video (live streaming)
7	Non-GBR	6	300	10^{-6}	Video (Buffered streaming)
8	Non-GBR	8	300	10^{-6}	FTP, e-mail, www
9	Non-GBR	9	300	10^{-6}	

Portadoras

Para intercambiar información entre un UE y una PDN se tiene que establecer ciertas portadoras específicas. Un UE al unirse a una red se establece una portadora predeterminada y portadoras dedicadas adicionales según sea necesario, hasta un total de 3 portadores de control de información y 11 portadores de datos. Cada una de las portadoras se transmite a través de un canal de mensaje diferente [13] [17].

Las portadoras de control de información son:

- **Signaling Radio Bearer 0 (SRB0):** Son mensajes RRC por el canal CCCH. Se utiliza para solicitar la conexión RRC, rechazo, restablecimiento, solicitud de restablecimiento y rechazo de restablecimiento.
- **Signaling Radio Bearer 1 (SRB1):** Se trata de mensajes NAS a través del canal DCCH, utiliza el Acknowledged Mode (AM). Se utiliza para la consulta o información de capacidad del UE, configuración para la completa conexión RRC, reconfiguración, comandos del modo de seguridad, informe de medición y comandos de movilidad.
- **Signaling Radio Bearer 2 (SRB2):** Los mensajes RRC de alta prioridad del canal DCCH utiliza el Acknowledged Mode (AM). Se utiliza para la transferencia de información en downlink y en uplink.
- **Data Radio Bearer (DRB):** Son numeradas del 1 al 11. Los paquetes de control y datos son enviados a diferentes portadoras de acuerdo con sus requerimientos de QoS. Los paquetes de usuario se analizan de acuerdo con sus direcciones de origen y destino y su número de puerto para definir sus requisitos de QoS de acuerdo con una plantilla de flujo de tráfico (TFT) asociada con una portadora.

c) Canales de los mensajes

Para que los datos sean transportados entre los diferentes protocolos, existen múltiples canales que se distinguen de acuerdo con el tipo de información que transportan y la forma en que la información es procesada [2] [18].

Canales Lógicos

Los canales lógicos transportan información específica entre procesos. Los canales lógicos llevan mensajes de datos y señalización que se transmiten entre las capas RLC y MAC. Los canales lógicos están conformados de canales de control y canales de tráfico. En la

Tabla 1.2 se detallan los canales lógicos, así como la función que realizan cada uno de ellos [13] [18].

Tabla 1.2. Canales Lógicos

Canal	Función	Downlink	Uplink
Canales de Control			
<i>Broadcast Control Channel</i> (BCCH)	Proporciona información acerca del sistema a todos los UE conectados al eNB	✓	
<i>Paging Control Channel</i> (PCCH)	Es utilizado para obtener información cuando se busca un UE en la red	✓	
<i>Multicast Control Channel</i> (MCCH)	Proporciona información relacionada con la recepción de multidifusión	✓	
<i>Common Control Channel</i> (CCCH)	Proporciona información de control antes que se establezca el enlace entre UE y eNB	✓	✓
<i>Dedicated Control Channel</i> (DCCH)	Transmite información de control específica para un UE	✓	✓
Canales de tráfico			
<i>Dedicated Traffic Channel</i> (DTCH)	Es utilizado para la transmisión de datos de usuario	✓	
<i>Multicast Traffic Channel</i> (MTCH)	Es utilizado para la transmisión de datos en multidifusión	✓	✓

Canales de Transporte

Los canales de transporte son los mensajes lógicos luego de haber sido agregada la trama MAC, permitiendo así que se analice la integridad del mensaje. Los canales de transporte permiten enviar datos y mensajes de señalización entre la MAC y la capa física. En la Tabla 1.3 se presentan las funciones de los canales de transporte [2] [17].

Tabla 1.3. Canales de Transporte

Canal	Función	
<i>Broadcast Channel</i> (BCH)	Es asignado al BCCH	Downlink
<i>Paging Channel</i> (PCH)	Es utilizado para transmitir el PCCH	
<i>Multicast Channel</i> (MCH)	Transmite la información del MCCH para configurar transmisiones multidifusión	
<i>Downlink Shared Channel</i> (DL-SCH)	Es el canal principal para la transmisión de información en <i>downlink</i> y utilizado por varios canales lógicos	Uplink
<i>Random Access Channel</i> (RACH)	Es utilizado para el procedimiento de acceso aleatorio e información de cómo el UE puede conectarse	
<i>Uplink Shared Channel</i> (UL-SCH)	Es utilizado para la transmisión de datos de usuario o mensajes de control en <i>uplink</i>	

Canales Físicos

Los canales físicos transportan los mensajes del canal de transporte entre hardware. Estos canales están definidos por su formato de señal, frecuencia, etc. Además, estos canales tienen la capacidad de multiplexar varios canales de transporte. En la Tabla 1.4 se describen las funciones de los canales físicos [17] [18].

Tabla 1.4. Canales Físicos

Canal	Función	
<i>Physical Broadcast Channel (PBCH)</i>	Transporta al canal BCH, así como información del sistema para los UEs que necesitan acceder a la red	Downlink
<i>Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)</i>	Puede transportar el DL-SCH o PCH, información sobre el <i>paging</i> y datos del plano de usuario	
<i>Physical Multicast Channel (PMCH)</i>	Se utiliza para transportar el MCH y se utiliza para servicios MBMS.	
<i>Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)</i>	Informa al UE acerca del formato de la señal que esta recibe, así como el número de símbolos OFDM utilizados para el canal PDCCH	
<i>Physical Downlink Control Channel (PDCCH)</i>	Transporta información de control en downlink como asignación de recursos e instrucciones para el control de energía	
<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)</i>	Informa el estado del <i>Hybrid ARQ</i> y lleva la señal que informa si un bloque de transporte fue recibido correctamente	Uplink
<i>Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)</i>	Es utilizado por el UE para la transmisión de datos y a veces lleva información de control	
<i>Physical Random Access Channel (PRACH)</i>	Es utilizado para el procedimiento RACH para obtener recursos y sincronización en uplink	
<i>Physical Uplink Control Channel (PUCCH)</i>	Proporciona varias señales de control, solicitudes de asignación de recursos e información CQI	

d) Señales Físicas

Los flujos finales de información LTE se transportan en forma de señales físicas, siendo esta la operación de nivel más bajo que se realiza en la capa física. En la Tabla 1.5 se menciona las principales señales físicas, así como las funciones que realiza cada una de ellas tanto en *uplink* como en *downlink* [2] [4].

Tabla 1.5. Señales Físicas

Señal	Función	
<i>Primary Synchronization Signal (PSS)</i>	Es utilizada para sincronización en tiempo y además define 3 grupos de ID de celda	Downlink
<i>Secondary Synchronization Signal (SSS)</i>	Es utilizada también para la sincronización, pero define 168 celdas para grupo definido en la señal PSS	
<i>Downlink Reference Signal (DRS)</i>	Proporciona una señal de referencia o piloto para la demodulación de datos en <i>downlink</i>	
<i>Uplink Reference Signal (URS)</i>	Proporciona una señal piloto para la demodulación de datos en <i>uplink</i>	Uplink
<i>Random Access Preamble (RAP)</i>	Forma parte del mensaje PRACH y usa una secuencia de Zadoff-Chu	
<i>Sounding Reference Signal (SRS)</i>	Permite al UE estimar la calidad y el tiempo del canal	
<i>DeModulation Reference Signal (DM-RS)</i>	Está asociado con el PUSCH y el PUCCH, pero se utiliza principalmente para estimar el canal para realizar la demodulación coherente	

1.3.4 Capa Física

La capa física se encarga de transportar información desde el canal de transporte MAC a través de la interfaz aérea. Es la que realiza la sincronización inicial en la búsqueda de celdas y la activación del handover. También mantiene el control de potencia y la transferencia confiable de la señal a través del acceso de radio entre el UE y eNB [14].

La capa física de LTE utiliza SC-FDMA para el enlace ascendente y OFDM para la transmisión de recursos de radio de enlace descendente entre UE y eNB, respectivamente. También admite el uso de MIMO para una mayor velocidad de datos en la sección de enlace descendente [17].

a) Técnicas de modulación

La forma más práctica para proporcionar mayores velocidades de datos sin necesidad de variar el ancho de banda de transmisión es el uso de una modulación de orden superior, lo que implica usar un alfabeto de modulación más amplio con el fin de incluir alternativas de señalización adicionales y, por lo tanto, permitir que se transmitan más bits de información por símbolo de modulación [9].

Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

En la modulación QPSK se desplaza de forma sistemática la señal portadora, en este caso se utilizan cuatro desplazamientos. Estos cuatro desplazamientos de fase permiten que se transmitan hasta 2 bits de información durante cada intervalo de símbolo de modulación.

Las cuatro alternativas de señalización pueden ser representadas como cuatro puntos diferentes sobre un plano bidimensional, como se observa en la Figura 1.4 (a) [9] [19].

Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

En la modulación QAM los bits de información están asociados con la amplitud y la fase de la portadora, lo que permite extender a modulaciones como 16QAM que cuenta con 16 alternativas de señalización. La modulación 16QAM permite la transmisión de 4 bits de información por cada intervalo de símbolo. Las distintas combinaciones se ilustran en la Figura 1.4 (b).

Una extensión adicional de la modulación QAM la que cuenta con 64 combinaciones de señalización se denomina 64QAM. Esta modulación se puede usar para transmitir 6 bits de información en cada intervalo de símbolo. La constelación de la modulación 64QAM se puede observar en la Figura 1.4 (c) [9] [13].

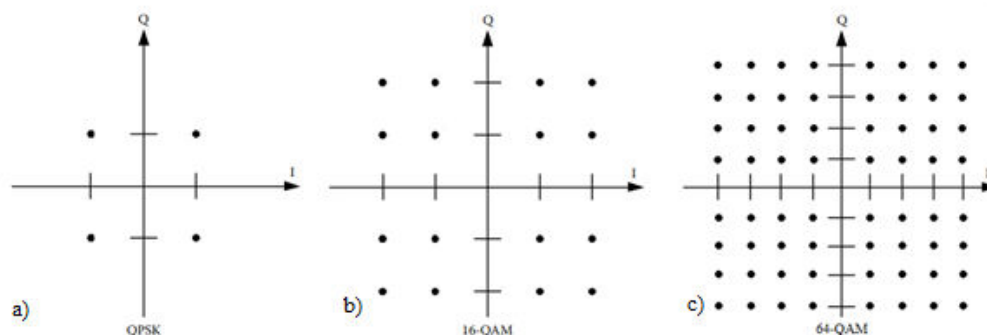


Figura 1.4. Constelaciones de las señales (a) QPSK, (b) 16QAM y (c) 64QAM

b) Técnicas de acceso múltiple

La transmisión de datos usando técnicas de acceso múltiple en la red LTE se basa en la multiplexación en el dominio de frecuencia. Básicamente, el acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA) se utiliza para la transmisión en *uplink* y el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) se utiliza para la transmisión en *downlink* respectivamente [20].

Estas técnicas de múltiples portadoras tienen varias ventajas con respecto a las técnicas anteriores como CDMA. Algunas de las ventajas son la solidez en la comunicación y la estrategia en la gestión de interferencias. Las técnicas de acceso múltiple permiten explotar la diversidad multiusuario. Estas técnicas usan subportadoras moduladas ortogonalmente para mejorar el desvanecimiento selectivo en frecuencia, lo que facilita el brindar soporte a varios usuarios durante la movilidad en diferentes condiciones de comunicación [21] [21].

OFDMA

Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) es la técnica de modulación que se utiliza para la transmisión en *downlink* en la red LTE para acceder al sistema inalámbrico de banda ancha móvil en 4G. OFDMA es una técnica de acceso múltiple basada en *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) que combina las técnicas de TDMA y FDMA. Esta técnica asigna una fracción del ancho de banda del sistema a cada usuario en cada intervalo de tiempo específico y garantiza mejores eficiencias espectrales y una mejor asignación de recursos en función de la respuesta en frecuencia y en el tiempo del canal [15] [21].

SC-FDMA

Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA) técnica de transmisión de acceso múltiple es utilizada para el *uplink* en LTE. SC-FDMA es una técnica de modulación muy sofisticada que combina varias ventajas de OFDM que incluye la asignación eficiente de frecuencia, bajo *Peak to Average Power Ratio* (PAPR) con resistencia de múltiples rutas para la transmisión en *uplink* de la red LTE. Una de las ventajas de SC-FDMA es la administración de energía en el UE durante la transmisión en *uplink*. Aunque, OFDMA tiene la ventaja de una mejor utilización de la banda estrecha disponible, SC-FDMA, por otro lado, es menos sensible al desvanecimiento selectivo de frecuencia del canal que OFDMA debido a su capacidad para ensanchar cada símbolo modulado de manera muy eficiente a través del ancho de banda total del canal [2] [12].

c) Técnicas de múltiples antenas

Otro de los aspectos fundamentales dentro de la tecnología LTE es el uso de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor. Esto es esencial para conseguir una mayor eficiencia espectral e incrementar la capacidad del sistema, dichos aspectos se fundamentan en tres principios: ganancia de diversidad, ganancia de arreglo y ganancia de multiplexación espacial [21].

Diversidad Espacial

La existencia de múltiples antenas en un sistema significa la existencia de diferentes rutas de propagación. Con la finalidad de aumentar la confiabilidad del sistema, se puede optar por enviar réplicas de la misma señal de datos a través de las diferentes rutas de propagación, teniendo en cuenta que cada señal sufrirá una diferente degradación lo que garantiza que al menos una réplica de la señal sufrirá menor degradación [2].

Multiplexación espacial

La multiplexación espacial tiene el propósito de aprovechar las múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor, al configurar múltiples flujos de datos paralelos entre ellos a través de diferentes antenas. Este proceso permite aumentar la velocidad de transferencia de datos sin necesidad de aumentar el ancho de banda o la potencia de transmisión [9].

Beamforming

El *Beamforming* o formación de haces no proporcionan diversidad o multiplexación espacial, pero reducen la trayectoria múltiple y por ende la interferencia.

Las matrices en fase se utilizan para crear anchos de haz estrechos mediante el envío de versiones de la misma señal con desplazamiento de fase a varias antenas, lo que resulta en una transmisión combinada de haz estrecho. Los cambios de fase se pueden ajustar para dirigir el haz. Cuanto mayor es el número de caminos, mayor es la directividad [13].

Single User MIMO (SU-MIMO)

En la transmisión SU-MIMO, solo se sirve a un usuario en un recurso de tiempo-frecuencia dado dentro de una celda, posiblemente a través de múltiples flujos de la señal. Con el supuesto de que se puede simplificar ya que el eNB y los UE tratan como ruido Gaussiano AWGN (Additive White Gaussian Noise) a la interferencia que proviene desde afuera de la celda en que se encuentran [4].

Multiple User MIMO (MU-MIMO)

Permite que múltiples usuarios sean atendidos en paralelo sobre un recurso de tiempo-frecuencia dado, por medio de multiplexación espacial. Mientras que en SU-MIMO la ganancia de multiplexación está limitada por el mínimo del número de antenas de transmisión y recepción, en MU-MIMO la ganancia de multiplexación se escala con el número de antenas de transmisión, siempre que haya suficientes usuarios en la celda [4].

d) Esquema de duplexación y estructura de las tramas

En LTE, las transmisiones de datos *downlink* y *Uplink* se organizan en tramas de radio de 10 ms cada una. Cada trama se divide en diez subtramas de igual tamaño. La duración de cada subtrama es de 1 ms. Además, cada subtrama se divide en dos intervalos de tiempo de igual tamaño, es decir, cada intervalo es de 0.5 ms. Se han definido dos tipos de tramas basadas en el esquema de duplexación utilizado. Estos son Tipo 1 cuando se usa FDD y Tipo 2 cuando se usa TDD [22].

Estructura de la trama tipo 1 o trama FDD

La estructura de trama tipo 1 permite transmisiones *half-dúplex* y *full-duplex* usa dos bandas de frecuencia o portadoras, una para *uplink* y otra para *downlink* como se ilustra en la Figura 1.5. Las tramas FDD tienen una duración de 10 ms y cada una de las ranuras es de 0.5 ms. Cada una de las tramas contiene 20 ranuras y una subtrama está formada por dos ranuras de las 20 ranuras por lo que se dispone de 10 subtramas dentro de la estructura de trama 1 [21].

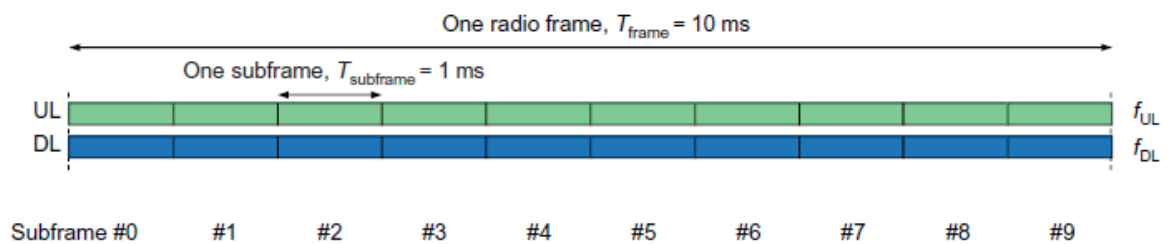


Figura 1.5. Estructura de la Trama FDD

Estructura de la trama tipo 2 o TDD

La trama tipo 2, por otro lado, utiliza las mismas bandas de frecuencia, que están separadas en el tiempo para la transmisión en *uplink* y en *downlink*. Está conformada por tres subtramas conocidas como *Guard Period* (GP), *Downlink Pilot Time Slot* (DWPTS) y *Uplink Pilot Time Slot* (UPTS), que tienen una longitud de 1 ms. La estructura de trama TDD se compone de dos medias tramas idénticas con una duración de 5 ms para cada una de ellas. Ambas medias tramas se subdividen en otro conjunto de cinco subtramas con una duración de 1 ms. La subtrama se divide en dos ranuras de 0.5 ms cada una. La Figura 1.6 ilustra la estructura de trama TDD y las subtramas [17] [21].

Las subtramas 0 y 5 siempre se asignan para transmisión en *downlink*, mientras que la subtrama 2 siempre se asigna para transmisiones en *uplink*. Las subtramas restantes pueden asignarse de manera flexible para la transmisión en *downlink* o *uplink* dependiendo de la configuración. Para evitar una interferencia severa entre las transmisiones en *downlink* y *uplink* en diferentes celdas, las celdas vecinas típicamente tienen la misma configuración de enlace. Esto hace que sea difícil cambiar dinámicamente la configuración de enlace, por ejemplo, cuadro por cuadro.

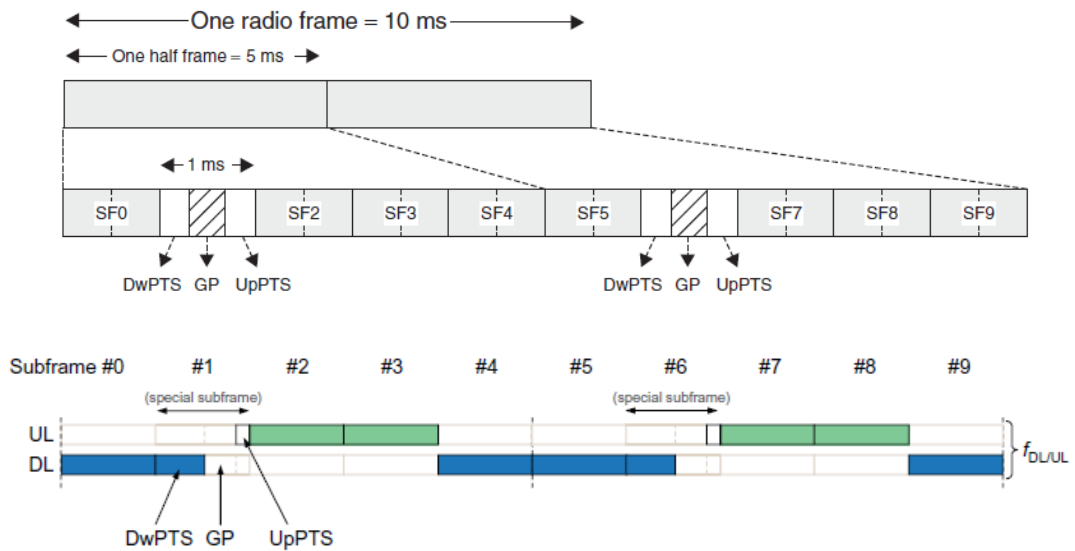


Figura 1.6. Estructura de la Trama TDD

Por lo tanto, la especificación LTE actual supone que la configuración de enlace es relativamente estática. Sin embargo, se puede cambiar muy lentamente para adaptarse a los patrones cambiantes del tráfico. También podría, en principio, ser diferente en distintas áreas, por ejemplo, para coincidir con los diversos patrones de tráfico, aunque la interferencia entre celdas debe abordarse cuidadosamente [22].

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada se basa en la simulación de la red LTE de la ciudad de Ibarra con la finalidad de proponer una solución de ampliación y optimización, mediante el análisis de parámetros como el SINR, RSRP, RSRQ y Throughput.

En el presente capítulo se desarrolla cada una de las fases empleadas para llevar a cabo la simulación del proyecto. En primer lugar, se revisarán los parámetros que permiten analizar el rendimiento, así como los niveles de cobertura de una red celular, lo cual facilita establecer una comparación entre la red inicial y la misma red luego de ser ampliada y optimizada.

En segundo lugar, se detalla el proceso de creación de una red LTE en el software ICS Designer, donde se describe el área que debe cubrir la red, los archivos de cartografía, la ubicación y configuración de los parámetros de las radio bases en función de la información suministrada por la operadora local.

Posteriormente, se mencionará el modelo de propagación y la geometría de difracción que mejor se ajusten a las características del terreno, así como también a la frecuencia utilizada por las redes LTE, que son aspectos necesarios para calcular la cobertura. Para el análisis se tendrá en cuenta también la recomendación *Requirements for support of radio resource management* de la *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*. Finalmente, se describe la configuración de las herramientas que presenta el Software ICS Designer para evaluar una red LTE [23].

2.1. Parámetros de rendimiento en LTE

En LTE se tienen varios parámetros de rendimiento, los que proporcionan información sobre la calidad del canal inalámbrico en la red. Brevemente se describen algunos de estos parámetros.

2.1.1. *Reference Signal Received Power (RSRP)*

Este parámetro se determina para una celda y está definido como la potencia promedio medida en vatios (W) de los *Resource Elements (RE)* que transportan señales de referencia específicas de la celda en todo el ancho de banda considerado, por lo que solo puede ser medido en los símbolos que transportan señales de referencia y solo se toma en cuenta la potencia recibida dentro de la parte útil del símbolo OFDM y no incluye la potencia del prefijo cíclico. Las mediciones de este parámetro se utilizan en procesos de selección, reelección de celda y handover [24] [25].

2.1.2. Reference Signal Received Quality (RSRQ)

RSRQ representa una mejor métrica para obtener más detalles sobre la calidad del canal y todo el ancho de banda. Este parámetro es un tipo de medida C/I que indica la calidad de la señal de referencia recibida. La medición RSRQ proporciona información adicional cuando RSRP no es suficiente para tomar una decisión confiable de handover o una reelección de celda [2].

RSRQ se puede definir como la calidad de la potencia recibida en los *Resource Elements* (RE) que contienen señales de referencia. Es un parámetro importante para evaluar la calidad de la señal recibida. Se define matemáticamente de la forma en que se muestra en la Ecuación 2.1.

$$RSRQ = N \frac{RSRP}{RSSI} \quad (2.1)$$

RSRQ se calcula utilizando RSRP y Received Signal Strength Indicator (RSSI). RSSI es el promedio de la potencia total recibida observada por el UE solo en símbolos OFDM que llevan señales de referencia proveniente de todas las fuentes. N es el número de *Resource Blocks* (RB) y su valor cambia según los recursos que le sean asignados al usuario en específico. La medición se puede hacer en banda estrecha donde N=62 subportadoras (6 *Resource Blocks*) o banda ancha donde N contempla todo el ancho de banda (hasta 100 *Resource Blocks*) [25] [26].

2.1.3. Signal to Noise plus Interference Ratio (SNIR)

Este parámetro expresa la relación entre la potencia de las señales utilizables y el promedio de la potencia de las señales de interferencia de canal provenientes de otras celdas dentro del sistema y la potencia del ruido. Dentro de las señales utilizables están involucradas principalmente las señales de referencia y el canal PDSCH. El *Channel Quality Indicator* (CQI) por medio del SNIR y las características del receptor permite conocer la velocidad de datos que puede soportar el canal [25].

En LTE, podemos encontrar varios tipos de SNIR que se enlistan a continuación:

- **SNIR RS:** Es utilizado para analizar la interferencia dentro de la detección de canales.
- **SNIR PDSCH:** Permite cuantificar la interferencia relacionada con la decodificación de datos.
- **SNIR PUSCH:** Es aplicado para determinar la interferencia en los datos en *uplink*.
- **SNIR PUCCH:** Es utilizado para conocer la interferencia dentro de la detección de los canales de control en *uplink*.

Cada canal tiene sus requisitos mínimos de SNIR para la detección. Los requisitos de SNIR dependen de los esquemas de modulación y varían de un canal a otro puesto que en LTE cada canal utiliza una modulación en particular [24].

Cada canal tiene sus requisitos mínimos de SNR de nivel para la detección. Este requisito de SNR depende de los medios de modulación para decodificar 64 QAM, la SNR debe ser alta cerca de 25 dB o más y, de la misma manera, para decodificar un QPSK, puede ser de aproximadamente 2dB o menos. Cada canal en LTE utiliza una modulación particular, por lo que el requisito de SNR también es acorde.

En la tabla 2.1 se observa los rangos de los parámetros RSRP, RSRQ y SNIR [27].

Tabla 2.1. Valores de intensidad de la señal en LTE

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

2.2. Simulación de una red LTE en ICS-Designer

En esta sección se describe la herramienta que se utilizará para realizar las simulaciones de la red y la forma de diseñar una red LTE dentro de la misma. Esta herramienta es el software ICS Designer, que es una solución de ingeniería y diseño de RF el cual permite la planificación, diseño y optimización de redes inalámbricas.

2.2.1. Área de Cobertura

Para la simulación de la red LTE se debe tener en cuenta el perímetro actual de la ciudad de Ibarra el mismo que ha crecido a través de los años, hasta alcanzar un área aproximada de 29.9 Km² de superficie como se aprecia en la Figura 2.1. La parte céntrica de la ciudad corresponde a un área urbana y los alrededores pueden ser considerados como áreas suburbanas, por tal motivo el área céntrica y los centros comerciales presentan una gran densidad de usuarios.

Además del crecimiento de la ciudad, también existe un aumento en la demanda de uso del servicio de datos debido a aplicaciones multimedia como navegación por internet, juegos interactivos, TV móvil, transmisión de video y transmisión de audio.

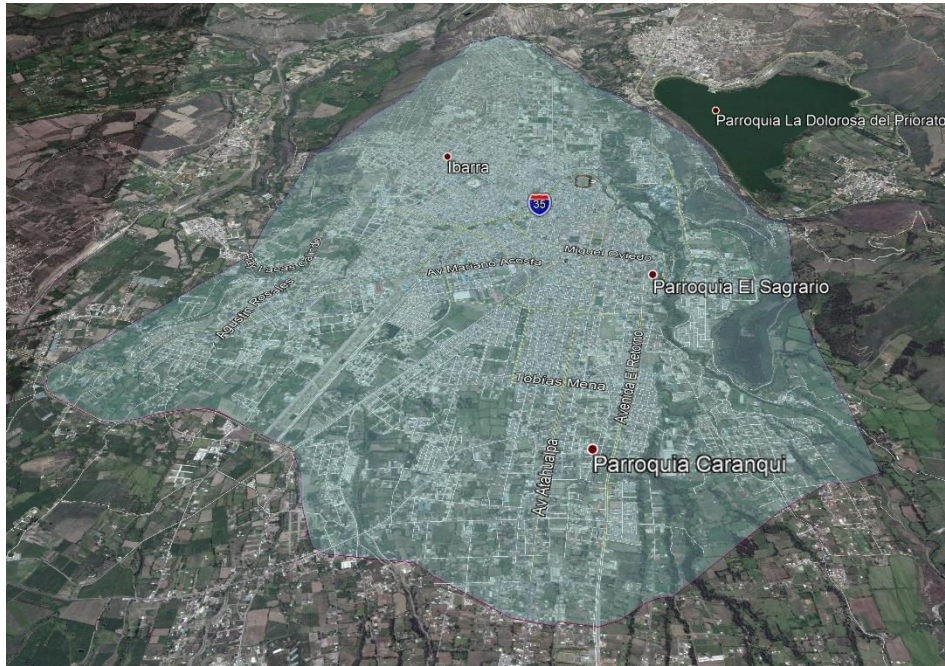


Figura 2.1. Perímetro de la ciudad de Ibarra

2.2.2. Cartografía

La información cartográfica es importante como base para realizar los estudios de cobertura, y el software ICS Designer distribuye esta cartografía en varias capas:

- **Digital Elevation Model (DEM):** Esta capa contiene el valor de altitud relacionada con cada pixel del archivo. La información de esta capa es usada para calcular la atenuación por difracción sobre el terreno.
- **Indoor Plan:** Esta capa puede reemplazar a la capa DEM cuando los estudios de propagación se realizan dentro de edificaciones. Esta capa contiene un código para cada pixel donde los valores del código corresponden a los diferentes materiales que se pueden encontrar dentro de un edificio.
- **Map Image:** Esta capa es solo una imagen, resultado de la digitalización de un mapa físico el cual se obtiene vía satélite o imágenes aéreas.
- **Clutter:** Esta capa describe de forma adicional el tipo de terreno en cada punto del área. Se pueden definir hasta 15 subclases diferentes, dependiendo del material del que está compuesto el terreno y clases libres que no son predefinidas, pero puede establecerse para cálculos particulares. Los códigos de esta capa pueden estar sujetos a organismos de regulación o pueden ser definidos por el usuario.
- **Buildings:** En esta capa se describe la altura de los edificios de forma individual. La información contenida en esta capa se usa preferentemente para saber si el

receptor se encuentra dentro o fuera del edificio. Además, esta capa está estrechamente ligada a la capa *clutter* [28].

En la Figura 2.2 se muestra los archivos cartográficos DEM, *image* y *clutter* requeridos para realizar los análisis de cobertura de la red LTE.

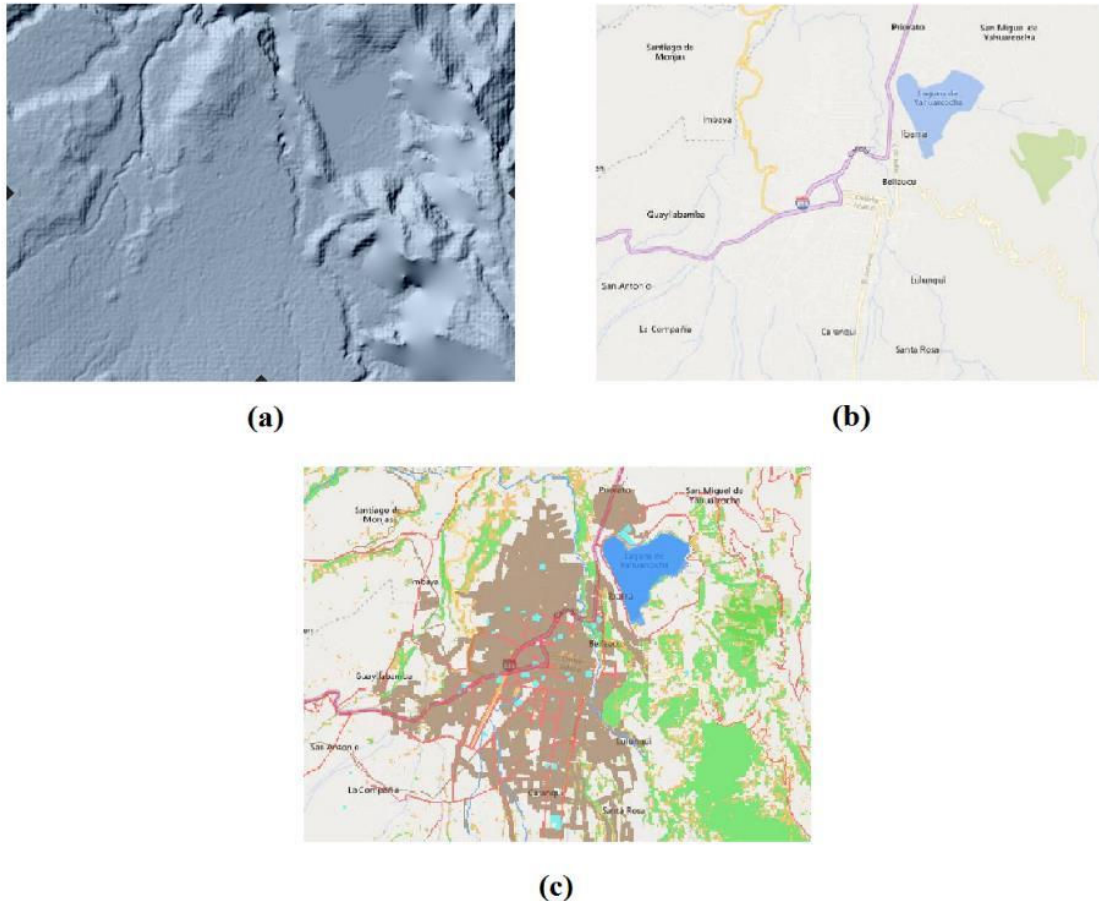


Figura 2.2. Cartografía (a) DEM, (b) *Image* y (c) *Clutter*

2.2.3. Ubicación de las Radio bases

Para colocar cada una de las radio bases se tomará en cuenta la ubicación y configuración propias de la red LTE de la ciudad de Ibarra perteneciente a la operadora local, para realizar un análisis real de la situación inicial de la red.

Las radio bases se disponen sobre el mapa de acuerdo a la Tabla 2.2, en donde se puede apreciar el nombre, la longitud y la latitud de cada una de las 11 radio bases que componen la red LTE. Las antenas se encuentran ubicadas sobre torres celulares y tienen diferentes configuraciones de tilt y azimuth para una mejor cobertura y evitar interferencias.

El ángulo de *azimuth* representa el punto en el que se fija la antena con respecto al plano horizontal, mientras que el *tilt* mecánico es el ajuste de inclinación usado para orientar el haz sobre un área específica con el fin de reducir o concentrar la radiación.

Tabla 2.2. Ubicación geográfica de las radio bases

Nombre	Longitud	Latitud	Altura (m)	Tilt (°)	Azimuth (°)
IBARRA NORTE	-78.12231	0.35043	38	0	0
IBARRA NORTE_1			29	3	70
IBARRA NORTE_2			38	1	290
IBARRA COOP. CHOFERES	-78.1296	0.35614	21	0	40
IBARRA COOP. CHOFERES_1			21	0	200
IBARRA COOP. CHOFERES_2			21	-1	320
IBARRA PLAZOLETA	-78.117388	0.349666	21	1	30
IBARRA PLAZOLETA_1			21	1	160
IBARRA PLAZOLETA_2			21	1	230
IBARRA SUR	-78.12498	0.33846	24	0	0
IBARRA SUR_1			24	0	140
IBARRA SUR_2			20	0	270
IBARRA CENTRO	-78.12008	0.34303	18	0	50
IBARRA CENTRO_1			18	0	200
IBARRA CENTRO_2			18	1	330
IBARRA EL EJIDO	-78.14036	0.34378	24	0	0
IBARRA EL EJIDO_1			24	0	120
IBARRA EL EJIDO_2			24	0	260
U. CATOLICA	-78.10744	0.3458	17.5	0	220
U. CATOLICA_1			17.5	0	320
TERMINAL TERRESTRE	-78.12925	0.3469	18	0	110
TERMINAL TERRESTRE_1			18	0	210
TERMINAL TERRESTRE_2			18	0	350
IBARRA ESTADIO	-78.119668	0.356085	18	2	20
IBARRA ESTADIO_1			18	0	170
IBARRA ESTADIO_2			18	0	300
AZAYA NORTE	-78.12489	0.36594	23.5	0	350
AZAYA NORTE_1			17.5	0	100
AZAYA NORTE_2			23.5	0	250
TEODORO GOMEZ	-78.11669	0.34166	17.5	0	30
TEODORO GOMEZ_1			17.5	0	170
TEODORO GOMEZ_2			17.5	0	260

En la Figura 2.3 se aprecia cómo se encuentran distribuidas las radio bases sobre el mapa de la ciudad de Ibarra. La red LTE en su estado inicial cuenta con 10 radio bases con 3 sectores y 1 radio base con 2 sectores.



Figura 2.3. Ubicación de las radio bases en la ciudad de Ibarra

2.2.4. Parámetros del eNodeB

Los parámetros deben ser configurados de forma individual en cada radio base. El software permite seleccionar el modo de duplexación, el patrón de radiación, la frecuencia de operación, el ancho de banda, la configuración física de las antenas, entre otros parámetros.

Además de las antenas, las radio bases cuentan también con un equipo transmisor conocido como *Remote Radio Unit* (RRU). El RRU es responsable de procesar la señal para que pueda ser transmitida por las antenas en la banda de frecuencia que opera la red, también proporciona un interfaz entre los enlaces físico y óptico [29].

La operadora tiene configurada la máxima potencia para la transmisión, es decir los 40 W. En la Tabla 2.3 se enlistan las características más relevantes de la RRU 3908 de Huawei [30] y además se adjunta al final del documento la hoja de datos en el ANEXO I.

Tabla 2.3. Características de la RRU 3908

Parámetro	Valor
Banda de Frecuencia	AWS
Rango de Frecuencia en <i>Uplink</i>	1710 MHz – 1755 MHz
Rango de Frecuencia en <i>Downlink</i>	2110 MHz – 2155 MHz
Ancho de banda	5, 10, 15 o 20 MHz
Capacidad	2 portadoras
Potencia de salida	40 W

La antena es el elemento que permite radiar la energía electromagnética que se origina en los transmisores, de la misma forma, recibe la energía que proviene de varios dispositivos móviles [31]. La operadora local usa la antena sectorial *Agisson A19451811* de Huawei que funciona dentro de la banda de frecuencia en la que opera la red LTE. En la Tabla 2.4 se indican las propiedades eléctricas de la antena, además en la Figura 2.4 se muestra el diagrama de radiación correspondiente [32]. La hoja de datos de la antena se encuentra en el ANEXO II.

Tabla 2.4. Propiedades eléctricas de la antena *Agisson A19451811*

Propiedades	Recepción	Transmisión
Rango de frecuencia	1710 – 1880 MHz	1920 – 2170 MHz
Polarización	$\pm 45^\circ$	
<i>Voltage Standing Wave</i> (VSWR)	≤ 1.4	
Ganancia	17.4 dBi	18 dBi
Ancho del haz (plano H)	67°	61°
Ancho del haz (plano E)	7.5°	6.7°
Relación frente-atrás	30 dB	
<i>Downtilt</i> eléctrico	$0^\circ - 10^\circ$	
Impedancia	50 Ω	

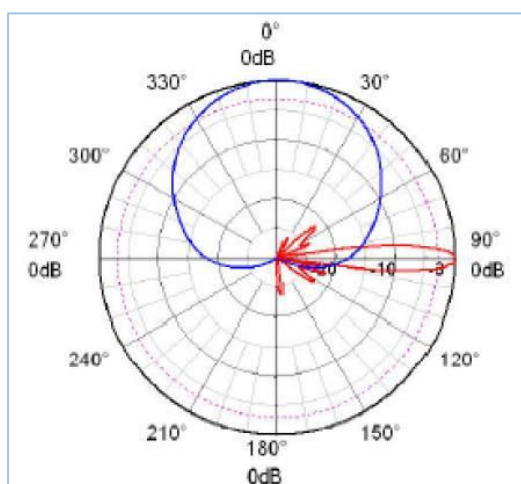


Figura 2.4. Diagrama de radiación de la antena *Agisson A19451811*

Para la simulación de la red LTE se utiliza la banda de frecuencia AWS-4 que ha sido asignada a la operadora. El rango de frecuencia en *uplink* es desde 1710 MHz hasta 1730 MHz, mientras que el rango para *downlink* es desde 2110 MHz hasta 2155 MHz. Por esta razón se selecciona la frecuencia de 2110 MHz como portadora.

Se selecciona una modulación adaptativa con la finalidad de transmitir con altas velocidades de información en condiciones de canal favorables y reducir la velocidad de información en respuesta a los efectos de degradación del canal [33].

Para la figura de ruido en el eNodeB se considera un valor de 5dB según las especificaciones LTE publicadas por el *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) [34]. Este parámetro denota a la relación señal a ruido “Signal Noise Ratio” (SNR) causado por los componentes internos del circuito receptor [2].

En la Tabla 2.5 se señalan los parámetros generales para configurar los eNodeB de la red LTE tomados como referencia de las especificaciones de la ETSI así como también de la guía de ATDI [35].

Tabla 2.5. Parámetros generales del eNodeB

Parámetros Generales	
Potencia	40 W
Ancho de banda del canal	20 MHz
Numero de RBs	100
Modo de duplexación	LTE FDD
Banda de operación	AWS-4 (1700/2100) MHz
Modo de transmisión	SU-MIMO SD 2x2
Pérdidas por cables	0.4 dB
Pérdidas adicionales	0.5 dB
Prefijo cíclico	Normal
Numero de símbolos OFDM por subtrama	14
Frecuencia de Portadora	2110 MHz
Figura de ruido	5 dB
Modulación	Adaptativa

Usando el prefijo cíclico normal, el receptor puede eliminar la interferencia entre símbolos con un retraso de 4.7 μ s, lo que corresponde a una diferencia de trayectoria de 1.4 km entre las longitudes de los rayos más largos y más cortos [4]. Por lo tanto, es suficiente usar una configuración de prefijo cíclico normal en áreas urbanas con tamaños de celda que no sean extensas.

Según los datos de la Tabla 2.5 se configura los parámetros del eNodeB donde el único parámetro que varía en las demás radio bases de la red es la altura de las antenas según

los datos de la operadora. En la Figura 2.5 se muestra la configuración de dichos parámetros, por otra parte, el parámetro *Equivalent Isotropically Radiated Power* (EIRP) se calcula de forma automática por el software y se define como la potencia que una antena isotrópica debe radiar para alcanzar el mismo nivel de densidad de potencia observada en la dirección de máxima ganancia de la antena utilizada.

Type	Signal
Tx/Rx A (0)	LTE FDD (60)
Tx/Rx	
Nominal power (W)	40
Dynamic (dB)	0
Tx ant gain (dBi)	17.90
Rx ant gain (dBi)	0.00
Losses (dB)	tx 0.40 rx 0.00
Tx add losses (dB)	0.50
E.I.R.P (W)	2004.749
Frequency (MHz)	2110.000000
Antenna height (m)	23.50
Tx bandwidth (kHz)	20000.00
Rx bandwidth (kHz)	20000.00

Figura 2.5. Configuración de parámetros de los eNodeB

Cuando se selecciona el ancho de banda, el número total de *Resource Blocks* (RB), el número total de subportadoras y el espacio entre subportadoras se actualizan de forma automática en la sección canales; al escoger un ancho de banda de 20 MHz el software muestra que corresponde a 100 *Resource Blocks* (RB) con 1200 subportadoras con una separación de 15 KHz.

2D antenna H+V (1 polarization) ...

A19451811 Zoom

Horizontal pattern -90 Vertical pattern +90

Tx pol V H C M

Rx pol V H C M

X polar. disc. (dB) 0

Tx ant gain (dBi) 17.90

Rx ant gain (dBi) 0.00

Antenna database

Diameter or size (m) 0.10 ... Aperture (°) 61.00

Crossover distance between near and far fields (m) 0.14

Two-line element set - Satellite catalog number 0

Azimuth (0-359°) 350.00 Sat...

Tilt (-90 +90°) 0.000

Standard antenna

SU-MIMO SD

SU-MIMO SM

MU/M-MIMO

SIMO

AAS

No. arrays T/R 2 / 2 <

MU 1 3.0 3.0 dB

BSR H/V +- 0 / 39 deg

Beam step H/V 15 / 39 deg

BSR=Beam steering range in degrees

Save .TRX Load .TRX 3D creation... Modify coverage* < >

Figura 2.6. Configuración de la antena de transmisión

Para configurar los parámetros de radiación se debe tomar en cuenta el diagrama de radiación de la antena Agissson A19451811. Se debe configurar un esquema que utiliza diversidad espacial SU-MIMO SD 2x2. Además, se debe modificar el valor de azimut y tilt de acuerdo a los datos de la red de la operadora. En la Figura 2.6 se muestra la configuración de una de las antenas.

En la sección de eNodeB el software permite configurar la distribución de la potencia la cual esta compartida entre las señales de referencia, canales de tráfico y canales de control. Además, se puede seleccionar el modo de duplexación y el tipo de prefijo cíclico. En la Figura 2.7 se presenta la distribución de potencia de acuerdo a la guía de ATDI [35].

Section	Parameter	Value
Input	Mode	FDD
	Cyclic prefix	Normal
	Antenna configuration	No. arrays T/R: 2 / 2; UE Rx array(s): 1
	TDD DL-to-UL configuration	DL-to-UL config 1
	Special subframe format type	Subframe Format 7
	Regural DL/UL subframes	4
	Special subframes	4
	DL/UL ratio	100.00
	Bandwidth (kHz)	20000.00
	PDCCH symbol(s)	3
Max power (W)	40.000000	
Output	#RE/PRB/subframe	16
	Number of OFDM symbols per subframe	14
	Total Number of PRBs per TTI	100
	Reference signal	4.762
	Primary synchronization signal (PSS)	0.086
	Secondary synchronization signal (SSS)	0.086
	PBCH / PRACH	0.157
PDCCH (ind. PCFICH, PHICH) / PUCCH	19.048	
PDSCH	75.862	

Figura 2.7. Configuración de potencia

2.2.5. Parámetros del equipo de usuario

Para realizar el análisis de cobertura es necesario configurar ciertos parámetros correspondientes al equipo de usuario seleccionando los valores de la figura de ruido, la altura y la ganancia de la antena según las recomendaciones de la ETSI y de 3GPP [34] [36].

Tabla 2.6. Parámetros del UE

Parámetros	UE
Ganancia de la antena	0 dBi
Altura de la antena	1.5 m
Figura de ruido	9 dB

2.3. Modelos de propagación y geometría de difracción

Los modelos de propagación permiten describir mediante expresiones matemáticas la propagación de las ondas de radio en base a ciertos parámetros como la distancia, la frecuencia y otros factores propios de cada modelo. Estos modelos se utilizan para predecir las pérdidas del enlace o para determinar la cobertura según el entorno y las características del terreno [37].

El software ICS Designer presenta varios modelos predefinidos para configurar la propagación de las ondas de radio. Para calcular la cobertura es fundamental seleccionar un modelo de propagación de acuerdo a características como la topografía del terreno, frecuencia en la que opera la red y distancia. Además de configurar el modelo de propagación también se debe seleccionar la geometría de difracción y el tipo de atenuación de subtrayecto que mejor se ajusten al entorno del área de estudio [38].

2.3.1. Modelo 3GPP LTE urban

El modelo de 3GPP LTE *urban* definido en las recomendaciones de 3GPP es aplicable para la planeación y análisis de cobertura en ambientes urbanos y suburbanos. Es un modelo empírico que considera ambientes con edificios que tienen una altura aproximadamente uniforme. El modelo permite calcular las pérdidas por propagación mediante la Ecuación 2.2 [39].

$$L = 40(1 - 4 \times 10^{-3} D h b) \log_{10}(D h b) - 18 \log_{10}(D h b) + 21 \log_{10}(f) + 80 \text{ dB} \quad (2.2)$$

Donde:

R : distancia entre la radiobase y el UE (Km)

f : frecuencia de la portadora (MHz)

$D h b$: altura de la radiobase (m)

Para calcular la pérdida por trayectoria se debe agregar también un valor de distribución log-normal (LogF) con una desviación estándar de 10dB, además se considera un factor

de correlación de *shadowing* de 0.5 para el desvanecimiento por sombra entre sitios y de 1 entre sectores del mismo sitio. La pérdida por trayectoria se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.3 [40].

$$Pathloss = L + \log F \quad (2.3)$$

2.3.2. Método Deygout 94

Este método permite determinar la geometría de difracción tanto en ambientes interiores como exteriores. Se trata de un método determinista el cual toma en cuenta las reflexiones desde el suelo y también considera cada uno de los obstáculos presentes entre el transmisor y el receptor, como se aprecia en la Figura 2.8. El método Deygout introduce el concepto de un borde de difracción principal. Si se encuentra otro borde de difracción en la ruta entre el obstáculo principal y el transmisor o entre el obstáculo principal y el receptor, la pérdida generada se suma a la del borde de difracción principal. [41] [42].

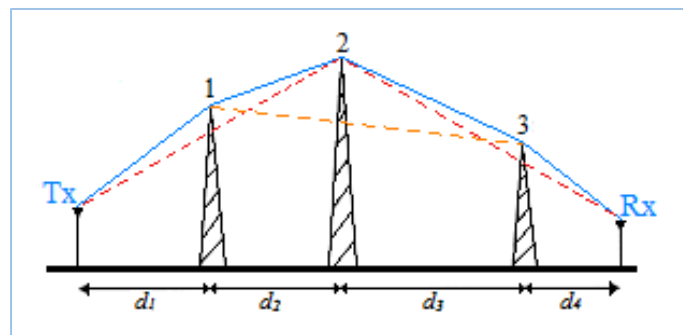


Figura 2.8. Configuración de los parámetros de propagación

Deygout 94 presenta una mejora generalizada de este método utilizando un número potencialmente infinito de bordes. La búsqueda de los bordes es secuencial: si existe el obstáculo principal, uno busca dos obstáculos secundarios (uno entre el transmisor y el obstáculo y el otro entre el obstáculo y el receptor). Luego, esta búsqueda se realiza nuevamente en cada lado de los obstáculos secundarios, posiblemente buscando obstáculos ternarios. Este proceso se reitera de forma recursiva mientras existan nuevos obstáculos [43] [44].

2.3.3. Selección del modelo de propagación en ICS-Designer

Para la simulación se utilizarán los modelos recomendados para el estudio de redes LTE. En la Figura 2.9 se observa la selección del modelo de propagación, modelo de difracción y la atenuación de subtrayecto.

Free space loss		+ Min [Diffraction, Tropo, Ducting, Reflections, Absorption] attenuation	
20.LOG[(4.PI.D) / wavelength] ISO	Diffraction geometry <input checked="" type="radio"/> Deygout 94 <input type="radio"/> Deygout 66 <input type="radio"/> Deygout 91 <input type="radio"/> Bullington <input type="radio"/> Delta Bullington <input type="radio"/> ITU-R 526, round mask <input type="radio"/> ITU-R 526, cylinders <input type="radio"/> Visibility / Indoor <input type="radio"/> No diffraction loss <input type="checkbox"/> Lateral diffraction (UTD) <input type="checkbox"/> Power correction (angle) <input type="checkbox"/> VHF correction	Subpath attenuation <input type="radio"/> Fresnel integrals <input checked="" type="radio"/> Standard <input type="radio"/> MD 91 method <input type="radio"/> Coarse integration <input type="radio"/> Fine integration <input type="radio"/> Fine enhanced <input type="radio"/> Area <input type="radio"/> Delta Bullington <input type="radio"/> Deygout 66 <input type="radio"/> Free ellipsoid <input type="radio"/> No subpath loss <input type="radio"/> More methods... <input checked="" type="checkbox"/> Fourth-power law FZ fraction <input type="text" value="1.00"/>	3D reflections <input type="checkbox"/> Multipath ... Reflection dist. limit (m) <input type="text" value="1000"/> Elevation filter > (m) <input type="text" value="0"/> Default coefficient <input type="text" value="0.500"/> <input type="button" value="calculator"/>
	Absorption / Penetration <input checked="" type="checkbox"/> Linear attenuations... <input type="button" value="Clutter settings..."/>	Ducting <input type="checkbox"/> Ducting ...	Troposcattering <input type="checkbox"/> ITU-R 617 NBS 101 <input type="checkbox"/> <input type="radio"/> equatorial <input type="radio"/> desert <input type="radio"/> subtropical <input type="radio"/> temperate <input type="radio"/> subtropical sea <input type="radio"/> temperate sea <input checked="" type="radio"/> continental Surface refractivity N0 <input type="text" value="320.00"/>
Propagation methods			
ITU / FCC (empirical and half determ.) <input type="radio"/> ITU-R 370 (30-1000 MHz)... <input type="radio"/> ITU-R 525/526-14 (RR) <input type="radio"/> ITU-R 525/526-11 <input type="radio"/> ITU-R 1546-5 (30-3000 MHz)... <input type="radio"/> ITU-R 1812-4 (30-3000 MHz)... <input type="radio"/> ITU-R 452-16 (0.1-50 GHz)... <input type="radio"/> ITU-R 452-14 (0.1-50 GHz)... <input type="radio"/> ITU-R 1147-4 (150-1700 kHz)... <input type="radio"/> ITU-R 368-9 (10 kHz-30 MHz)... <input type="radio"/> ITU-R 1009-1 (LoS) <input type="radio"/> ITU-R 528-3 (V/U/SHF)... <input type="radio"/> ITU-R 1225 (IMT 2000) <input type="radio"/> ITU-R 2001-2 (30 MHz - 50 GHz) <input type="radio"/> ITM NTIA (20 MHz-20 GHz)...	3GPP / COST (empirical) <input type="radio"/> Durkin <input type="radio"/> 3GPP-LTE urban (0.9-2 GHz) <input type="radio"/> 3GPP-LTE rural (0.9-2 GHz) <input type="radio"/> SUI method (2.5-2.7 GHz)... <input type="radio"/> Okumura-Hata (150-1500 MHz) <input type="radio"/> Hata - Cost 231 (150-2000 MHz) <input checked="" type="radio"/> Extended Hata (30-3000 MHz) <input type="radio"/> Cost 231 open... <input type="radio"/> Walfisch-Ikegami (800-2000 MHz) <input type="radio"/> Modified Hata model by ACMA <input type="button" value="Area table..."/>	Specific / External <input type="radio"/> BR method (1/2 wave 75 ohms) <input type="radio"/> Wojnar method (1-1000 MHz) <input type="radio"/> CCIR - MF (550-1700 kHz) <input type="radio"/> Egli (V/UHF) <input type="radio"/> Ext. model (DLL) <input type="button" value="Select..."/> <input type="checkbox"/> Composite output <input type="checkbox"/> Use Tx/Rx effective heights <input checked="" type="checkbox"/> Flat earth profile sent to DLL <input checked="" type="checkbox"/> Reverse profile	

Figura 2.9. Configuración de los parámetros de propagación

2.3.4. Parámetros de clutter

El software ICS-Designer permite tomar en cuenta las diferentes posibilidades de atenuación debidas a la penetración de la señal dentro de la capa clutter. Los valores de altura y atenuación se modificaron para obtener una mayor aproximación a la red desplegada por la operadora.

En la Figura 2.10 se observan los valores de atenuación, altura y factor de reflexión configurados para cada uno de los códigos de clutter que describen el tipo de terreno. Para la simulación de la red es necesaria la atenuación por absorción, la misma que depende de los valores de atenuación del clutter [45].

Clutter code	Name	dB/km - Atten (dB)		Clutter height	Reflection coef. (0-1)	Erlang/km2	Surface factor	Diffraction factor	Stddev (dB)	
0	rural	0.0	4.0	0	0.250	1.0000	1.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
1	suburban	0.0	8.0	4	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
2	urban 6 m	0.0	12.0	7	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
3	urban 12 m	0.0	12.0	11	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
4	urban 30 m	0.0	15.0	15	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
5	forest	0.0	8.0	18	0.111	1.0000	1.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
6	Sea	0.0	0.0	0	0.020	1.0000	0.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
7	urban 50 m	0.0	0.0	20	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
8	wood	0.0	8.0	2	0.080	1.0000	1.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
9 *	road or roof	0.0	0.0	0	0.058	1.0000	1.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
10	user 1	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
11	user 2	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	0.60	1.00	<input checked="" type="checkbox"/> rx ground
12	indoor 2 floors	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	
13	indoor 4 floors	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	
14	indoor 6 floors	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	
15 *	TGV	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	
16 *	indoor 10 floors	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	
17 *	indoor 15 floors	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	
18 *	indoor 20 floors	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	
19 **	Border*	0.0	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.00	

init

dB/km
 Flat+diffraction
 CCIR
 UER
 User
 Tuning
 None
 TSB-88

Height factor
 Building entry loss P,2109 dB
 Ref. frequency MHz
 No diffraction if clutter code= -1=none

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

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

Figura 2.10. Configuración de los parámetros del clutter

2.4. Ampliación y optimización de la red LTE

El crecimiento de la ciudad de Ibarra hacia sus zonas periféricas, así como la construcción de nuevos edificios y conjuntos habitacionales dentro de la misma dan como resultado un aumento de usuarios y un área más extensa que cubrir por las redes de telefonía móvil. Por tal motivo, las operadoras tienen la obligación de ampliar y optimizar las redes de telefonía móvil para garantizar un servicio de calidad con mayores velocidades, bajas latencias y una excelente cobertura.

2.4.1. Creación de nuevas radiobases

Se crearán dentro del software ICS-Designer nuevas radiobases en lugares estratégicos para cubrir los huecos de cobertura e incrementar el alcance de la red. Las nuevas radiobases tendrán las mismas características y patrones de radiación que las radiobases existentes.

2.4.2. Optimización

Para mejorar los niveles de cobertura y reducir los niveles de interferencia se optimizarán los parámetros de cada una de las estaciones de la red inicial. Los parámetros a ser

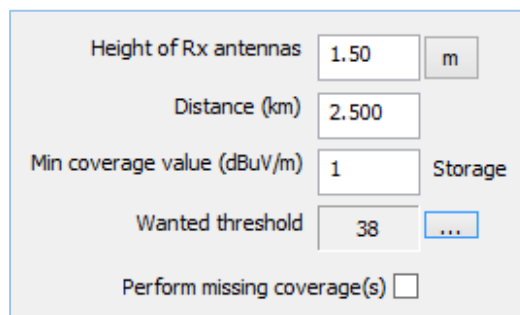
optimizados corresponden a la altura de las antenas de transmisión y los ángulos de *azimuth* y *tilt*.

2.5. Herramientas de simulación

El software ICS Designer dispone de varias herramientas de simulación que permiten evaluar la calidad de la señal y los niveles de cobertura.

2.5.1. Tx/Rx *Field Strength* (FS)

La herramienta Tx/Rx FS permite analizar la cobertura de la red en downlink mediante el parámetro RSRP en base a los parámetros configurados en las radiobases. Para calcular la cobertura es necesario configurar la altura de las antenas receptoras y la distancia entre el transmisor y el receptor. Además, se debe establecer un mínimo valor de cobertura y un valor de umbral deseado, en este caso el valor de umbral establecido es de 38 dBuV/m, equivalente a -106 dBm [46]. La configuración de la cobertura se muestra en la Figura 2.11.



Height of Rx antennas	1.50	m
Distance (km)	2.500	
Min coverage value (dBuV/m)	1	Storage
Wanted threshold	38	...
Perform missing coverage(s)	<input type="checkbox"/>	

Figura 2.11. Parámetros de cobertura

2.5.2. SNIR *maps*

Para analizar la interferencia el software dispone de la herramienta SNIR *maps*, para realizar este cálculo se deben configurar algunos parámetros. La opción SNIR (PDSCH) permite calcular la interferencia en *downlink* de los canales de tráfico de las estaciones LTE de acuerdo con el piso de ruido en cada punto del terreno. Se selecciona también la opción *server=de-activated and activated* para considerar el mejor servidor basado en los valores del parámetro RSRP. Además, se establece el valor del ruido térmico (KTBF) del receptor.

La herramienta presenta otras opciones para configurar como lo son el *Interference Rejection Factor* (IRF) y la *Inter Cell Interference Coordination* (ICIC). Los valores IRF definen la atenuación que se aplicará a una señal interferente cuando interfiera una señal deseada [47]. El valor de ICIC *enhancement* reducirá el nivel de interferencia intercelular. En la Figura 2.12 se presenta los parámetros configurados en la herramienta SNIR *maps*.

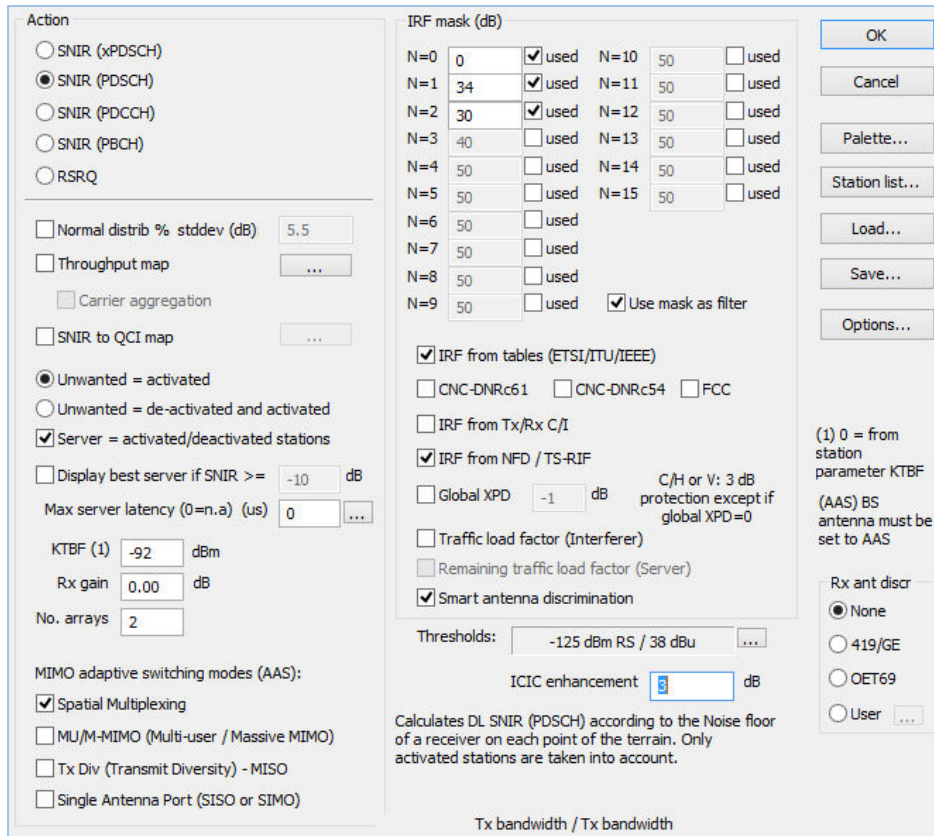


Figura 2.12. Configuración de la herramienta SNIR maps

2.5.3. RSRQ maps

Esta función muestra el mapa SNIR de la red LTE en términos de señal de referencia, teniendo en cuenta el valor del nivel de interferencia encontrado en cada punto. En la Figura 2.13 se muestra la configuración de la herramienta RSRQ maps, se debe seleccionar la opción RSRQ map (dB), mientras que el valor de KTBf y el valor de umbral corresponden a los mismos valores configurados en la herramienta SNIR maps.

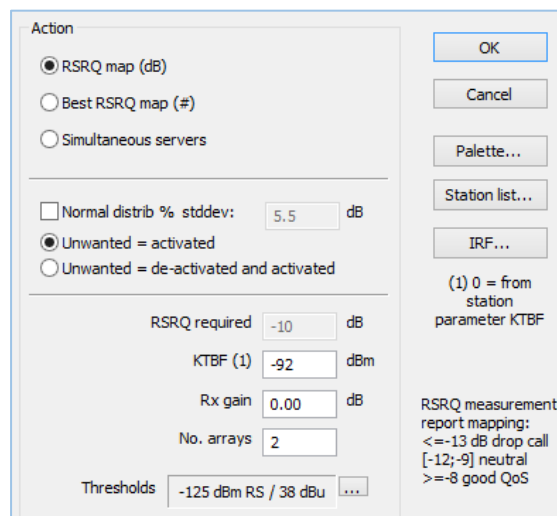


Figura 2.13. Configuración de la herramienta RSRQ maps

2.5.4. *Throughput map*

La opción de *Throughput map* se encuentra dentro de la herramienta *SNIR maps*. Esta opción mostrará un mapa con los niveles de *Throughput* de acuerdo al SNIR requerido y calculado según la fórmula de Shannon. La Figura 2.14 muestra la selección de esta herramienta.

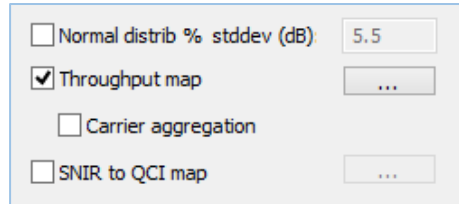


Figura 2.14. Selección del *Throughput map*

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se evalúa el rendimiento de la red inicial, así como también la cobertura alcanzada por la red luego de haber sido ampliada y optimizada. El análisis de la red se realiza en base a los parámetros RSRP, RSRQ, SNIR y Throughput donde se incluyen los mapas de cobertura en los cuales se puede apreciar la superficie cubierta y los valores que alcanza cada uno de los parámetros dentro del área de cobertura.

3.1. Análisis de la red inicial

Para poder obtener resultados precisos de la cobertura se utilizó información proporcionada por la operadora local sobre la configuración de cada una de las radio bases. Para cada radio base considerada, el conjunto de parámetros incluyó las coordenadas geográficas, la altura y el tipo de la antena, la potencia de transmisión y los valores de *tilt* y *azimuth*.

Una vez que las radiobases se encuentran situadas y los parámetros LTE han sido configurados; el software ICS-Designer permite estudiar el rendimiento de la red mediante varios mapas de cobertura. En dichos mapas se puede apreciar los diferentes niveles de intensidad de señal.

3.1.1. Análisis del parámetro RSRP

En la Figura 3.1 se muestra la cobertura y los valores alcanzados por el parámetro RSRP. Los niveles de cobertura están relacionados con los rangos de valores de la Tabla 2.1 que corresponden a la calidad de la señal.

De los resultados que se presentan en el reporte detallado del software ICS Designer sobre el parámetro RSRP se puede remarcar lo siguiente:

- El área total de cobertura alcanzada por la red inicial corresponde a 33.67 Km². La cobertura se compone de todos los valores de RSRP que se encuentran por encima del valor umbral establecido (-106 dBm) para la simulación.
- El mínimo valor de RSRP presente dentro de la cobertura es de -99.71 dBm el cual también se encuentra sobre el umbral establecido.
- De acuerdo con cada rango de señal establecido en la Tabla 2.1 se tiene que dentro de 21.03 Km² el nivel señal es excelente, dentro de 5.75 Km² el nivel de señal es bueno, mientras que en 6.89 Km² el nivel de la señal es aceptable.

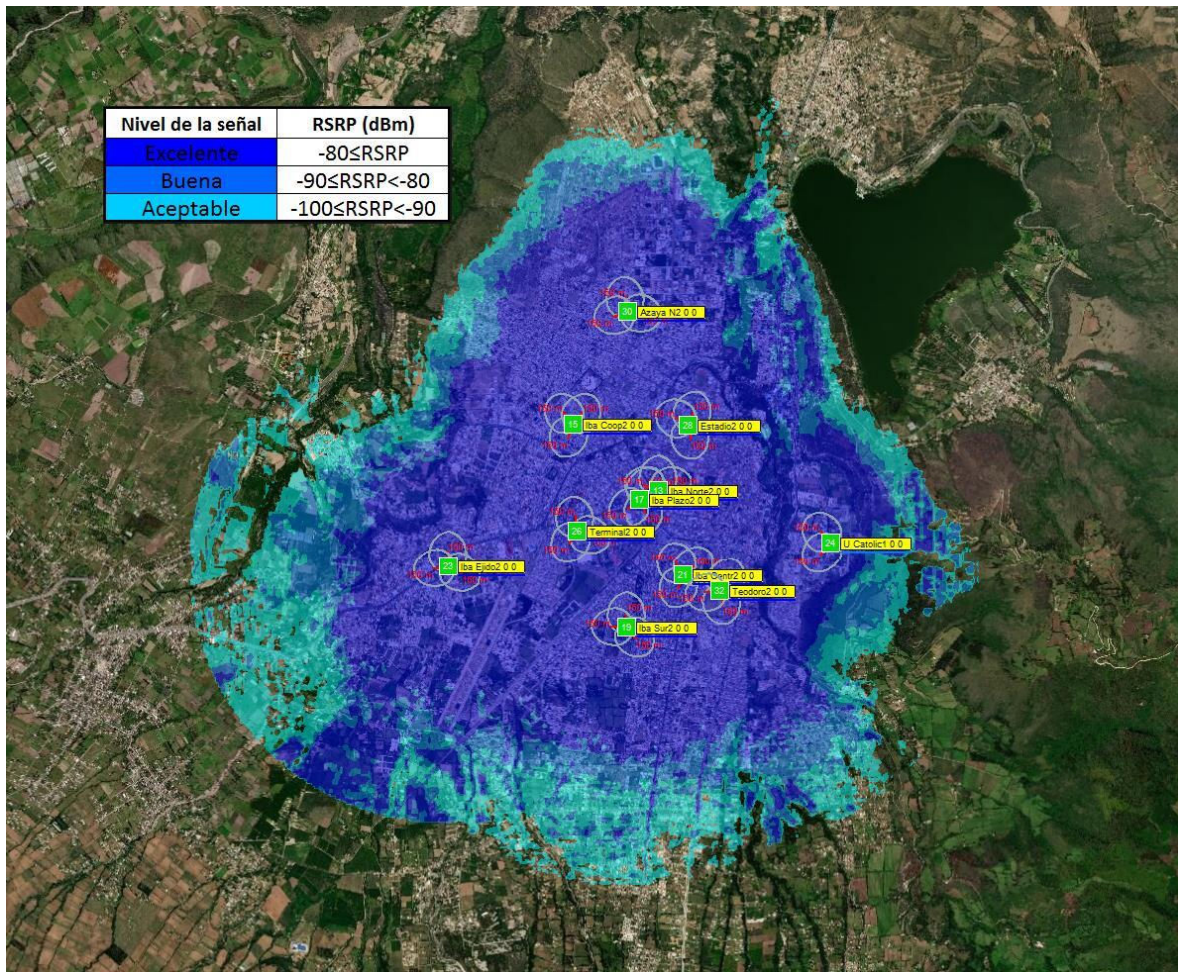


Figura 3.1. Mapa de cobertura RSRP red inicial

3.1.2. Análisis del parámetro SNIR

Para evaluar la interferencia que existe dentro de la red se lo realiza mediante la herramienta SNIR Maps. La interferencia que se analiza es la producida en el canal de tráfico (PDSCH), además en los cálculos también se considera el valor del piso de ruido del receptor de -92 dBm, mencionado en el Capítulo 2.

Los resultados proporcionados por la herramienta SNIR Maps se encuentran expresados por la relación *Carrier to Interference (C/I)* cuyo valor se mide en dBs.

En la figura 3.2 se aprecia la interferencia existente sobre la zona de cobertura y del reporte en el cual se presentan los valores de SNIR obtenidos se puede resaltar lo siguiente:

- El mínimo valor de SNIR encontrado dentro de la zona de cobertura es de 0 dB.
- El área total de cobertura en la que se analizan los valores del parámetro SNIR corresponde a 31.66 Km².

- Las áreas de cobertura según los rangos establecidos en base a la calidad de señal son de 4.78 Km² para un nivel de señal excelente, 14.34 Km² para una calidad de señal buena y 12.54 Km² cuentan con una calidad de señal aceptable.

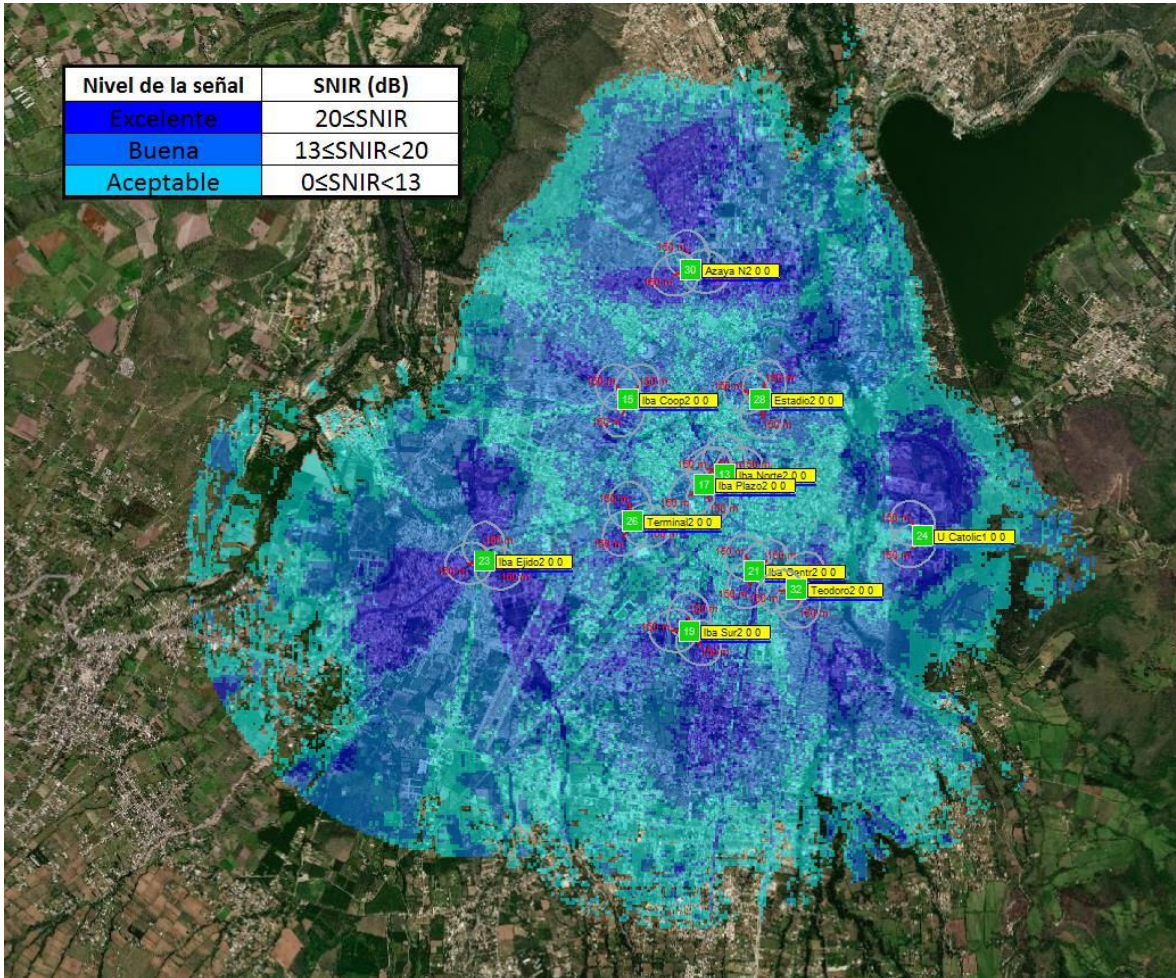


Figura 3.2. Mapa de cobertura SNIR red inicial

Tal como se puede apreciar en el mapa de cobertura no existen zonas de sombra, sin embargo, en la parte central de la ciudad especialmente el área entre las radio bases Terminal e Ibarra Sur, presenta cierto solapamiento debido a la proximidad de los sitios. La cercanía de los sitios hace que exista una mayor interferencia haciendo que la calidad de señal se degrade.

3.1.3. Análisis del parámetro *Throughput*

Haciendo uso de la herramienta *Throughput Map* se pudo observar los rangos de *throughput* alcanzados por la red inicial. Los rangos de *throughput* así como cada uno de los colores que identifican a los mismos, se muestran al costado derecho de la Figura 3.3.

El parámetro *throughput* es un indicador de rendimiento muy importante de una red. Los valores de *throughput* se calculan en base a los valores de SNIR mediante la fórmula de *Shannon*.

En el informe correspondiente se presentan los porcentajes de cobertura de cada uno de los rangos de *throughput* donde se puede apreciar que los rangos de menor valor son los que predominan en la zona de cobertura.

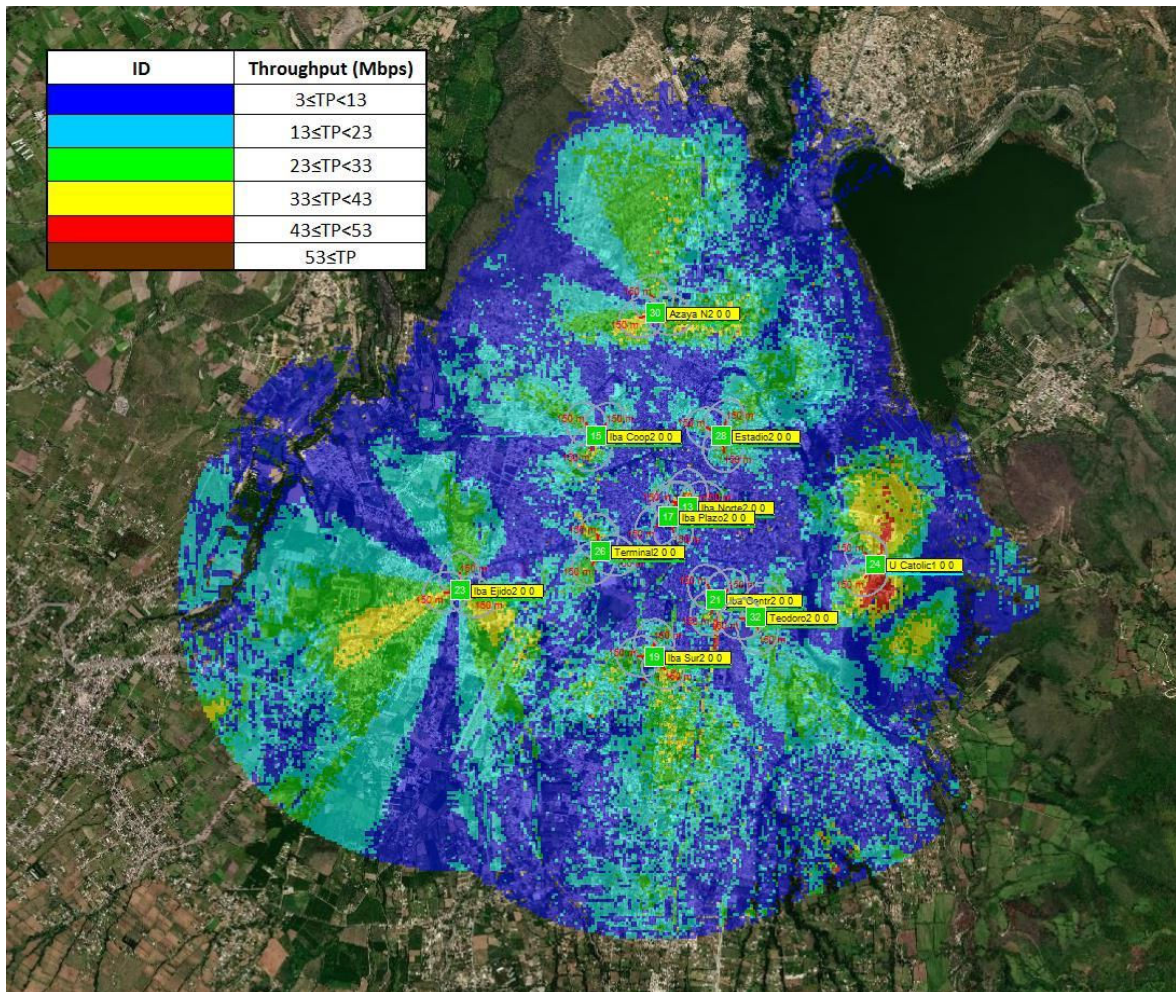


Figura 3.3. Mapa de cobertura de *Throughput* red inicial

3.1.4. Análisis del parámetro RSRQ

Dentro de la sección SNIR Maps del software ICS Designer también es posible evaluar cobertura en *downlink* del parámetro RSRQ. El parámetro RSRQ indica la calidad de la señal de referencia, según lo detallado en la Tabla 2.1 el mínimo valor de RSRQ necesario para que la señal pueda ser detectada es de -20 dB.

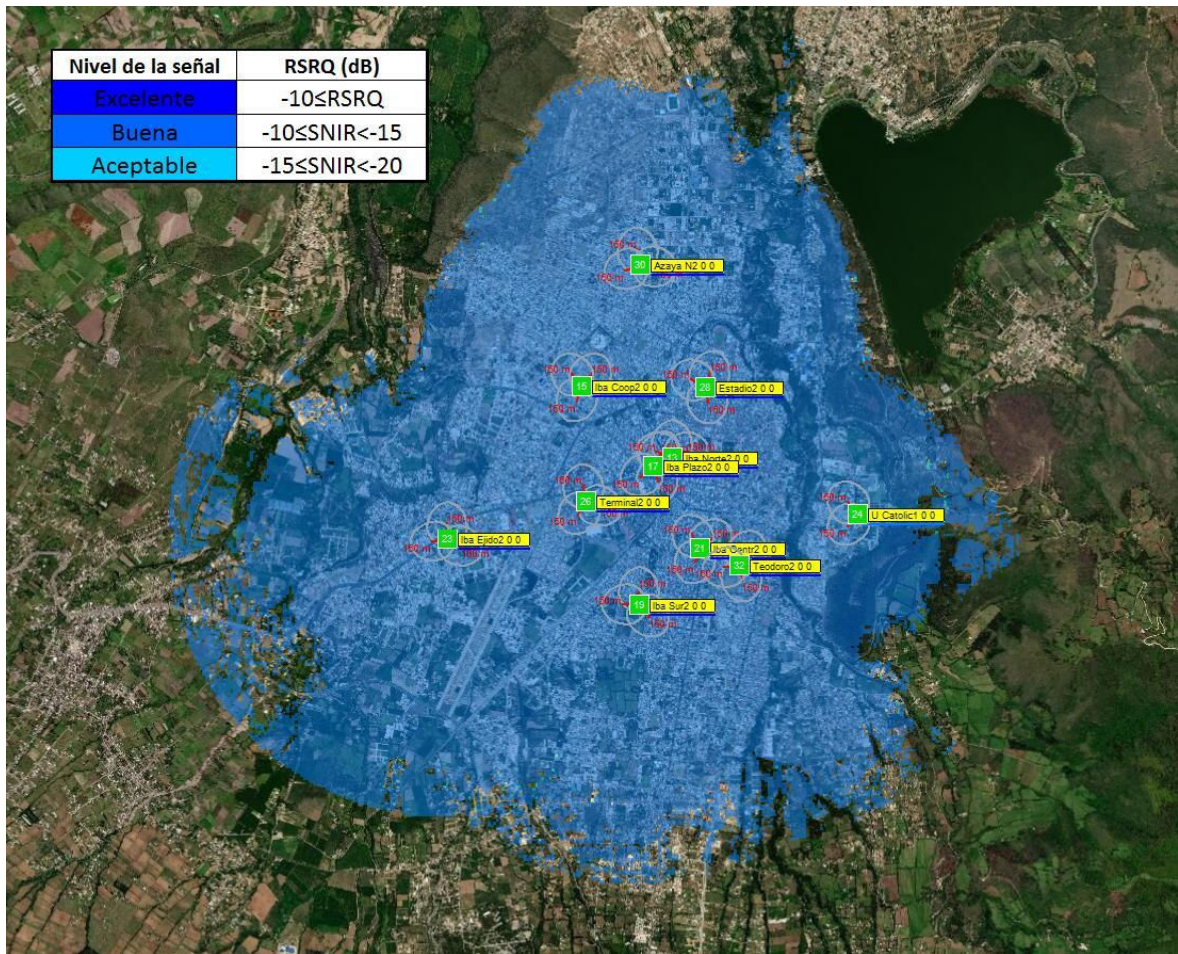


Figura 3.4. Mapa de cobertura de RSRQ red inicial

En la Figura 3.4. se muestra el mapa de cobertura del parámetro RSRQ, así como también los valores encontrados. De acuerdo con los resultados de la simulación se puede apreciar que la mayor parte de la zona de estudio está cubierta por valores de -11 y -12 dB.

3.2. Ampliación y Optimización de la Red

A partir de los datos obtenidos en la sección anterior, luego de haber realizado la simulación de la red inicial. Se procederá a modificar la configuración de las antenas (altura, azimuth, tilt, etc) de cada uno de los sectores, además se colocarán nuevos sitios, con el objetivo de ampliar y optimizar la red para que alcance mejores niveles de cobertura en toda la ciudad, incluyendo las zonas que se han poblado en la periferia.

3.2.1. Ampliación de la Red LTE

Para alcanzar una cobertura total dentro de toda la ciudad se ha dispuesto agregar 5 nuevos sitios, 3 sitios con 3 sectores y 2 sitios con 2 sectores, los que se encuentran ubicados según la Tabla 3.1 y se puede apreciar sobre el mapa en la Figura 3.5.

Tabla 3.1. Ubicación de los nuevos sitios

Nombre	Longitud	Latitud	Altura (m)	Tilt (°)	Azimuth (°)
N_PLAN VIVIENDA			15	3	20
N_PLAN VIVIENDA 1	-78.122281	0.379253	17.5	1	100
N_PLAN VIVIENDA 2			15	3	200
N_ALPACHACA					18.5
N_ALPACHACA 1	-78.134885	0.364144	15.5	2	240
N_FLORIDA					19
N_FLORIDA 1	-78.149148	0.338514	19	1	235
N_FLORIDA 2			19	1	340
N_CARANQUI					24
N_CARANQUI 1	-78.126287	0.328051	24	1	200
N_CARANQUI 2			24	1	310
N_ARCANGEL					15
N_ARCANGEL 1	-78.107029	0.362876	15	1	340

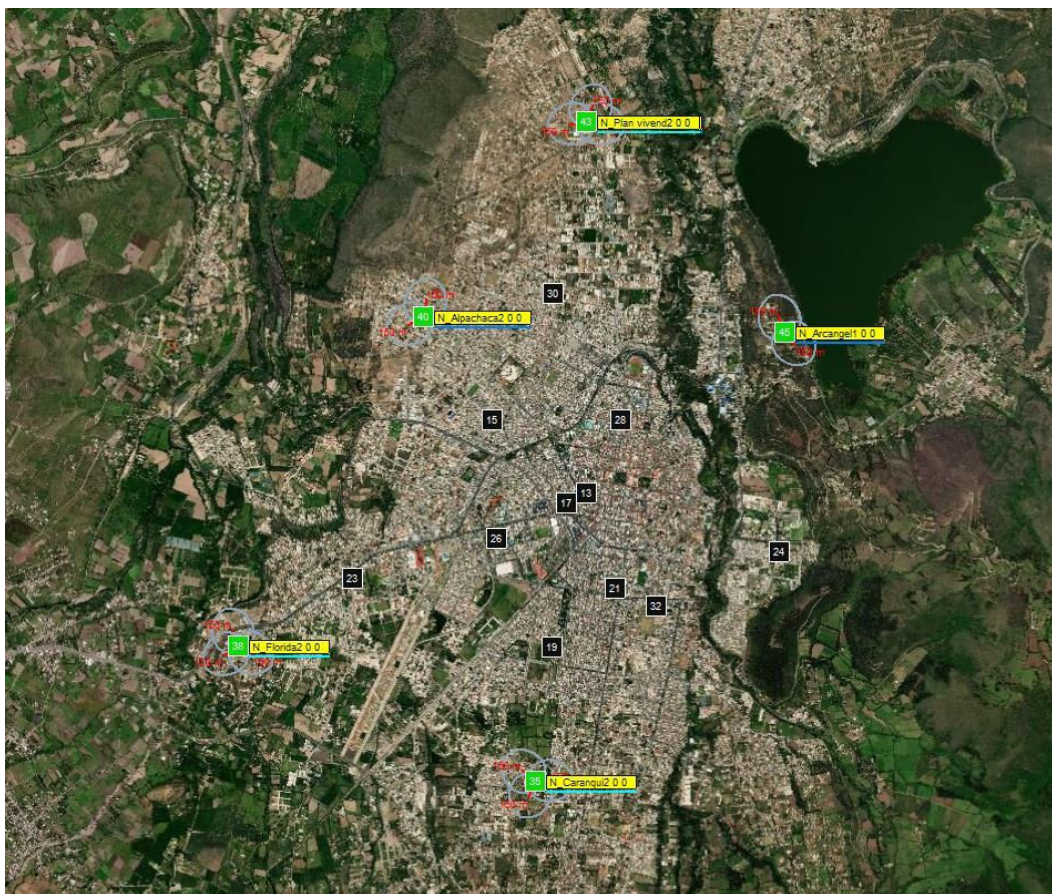


Figura 3.5. Ubicación de los nuevos sitios sobre el mapa

El número de nuevos sitios, así como los puntos en los que han sido ubicados se determinaron teniendo en cuenta las zonas periféricas de la ciudad que presentan una cobertura deficiente, la situación geográfica del terreno y la ubicación de los sitios existentes para evitar el solapamiento e interferencia.

Plan vivienda: Se eligió esta ubicación debido a que la cobertura de la radio base Azaya Norte es deficiente al no lograr cubrir completamente el sector norte de la ciudad donde se han construido varios conjuntos habitacionales.

Alpachaca: Se colocó una nueva radio base en esta ubicación debido a que las radio bases más cercanas Azaya Norte, Ibarra Coop. Choferes e Ibarra el Ejido no brindan una completa cobertura sobre la loma de Azaya. En este sitio solo se colocaron dos sectores para evitar interferencia con las mismas radio bases cercanas.

Florida: Este sitio está ubicado sobre la parte más alta del barrio la Florida con el fin de brindar cobertura al nuevo perímetro de la ciudad delimitado en la parte oeste por el corredor Periférico sur y el anillo vial.

Caranqui: Esta nueva radio base permite incrementar la cobertura de la red LTE sobre la parte sur de la ciudad de Ibarra tomando en consideración la zona que no se lograba cubrir en su totalidad por la radio base Ibarra Sur.

Arcángel: Esta radio base ubicada sobre la loma, cerca del mirador San Miguel Arcángel permite evitar zonas de sombra generadas por la misma loma y garantiza la cobertura en las cercanías del río Tahuando. Este sitio también cuenta solo con dos sectores con los que se provee cobertura sobre la ciudad, pero se podría incrementar otro sector para dotar de cobertura a la laguna de Yaguarcocha.

3.2.2. Optimización de la Red LTE

Luego de haber analizado los mapas de cobertura de la red LTE inicial se detectaron las zonas de sombra y las zonas con cobertura deficiente existentes dentro de la Ciudad. Para solventar estos problemas se procedió a variar los parámetros referentes a las antenas y al despliegue de radio como se muestra en la Tabla 3.2. Entre ellos se incluyen la dirección de la antena en *azimuth* e inclinación y las alturas de la antena. El ajuste de cada uno de esos parámetros es una compensación entre la cobertura de una celda de servicio y la interferencia a otras celdas. Inclinación de una antena hacia abajo, por ejemplo, reduciría la interferencia a las celdas lejanas.

Tabla 3.2. Optimización de las estaciones existentes

Nombre	Altura (m)		Tilt (°)		Azimuth (°)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
IBARRA NORTE	38	36	0	1	0	55
IBARRA NORTE_1	29	27	3	3	70	120
IBARRA NORTE_2	38	36	1	3	290	335
IBARRA COOP. CHOFERES	21	20	0	3	40	50
IBARRA COOP. CHOFERES_1	21	20	0	3	200	210
IBARRA COOP. CHOFERES_2	21	21	-1	0	320	310
IBARRA PLAZOLETA	21	21	1	3	30	345
IBARRA PLAZOLETA_1	21	21	1	3	160	145
IBARRA PLAZOLETA_2	21	21	1	3	230	225
IBARRA SUR	24	20	0	3	0	350
IBARRA SUR_1	24	23	0	1	140	130
IBARRA SUR_2	20	20	0	1	270	250
IBARRA CENTRO	18	18	0	1	50	40
IBARRA CENTRO_1	18	18	0	3	200	190
IBARRA CENTRO_2	18	18	1	3	330	320
IBARRA EL EJIDO	24	24	0	1	0	345
IBARRA EL EJIDO_1	24	24	0	3	120	130
IBARRA EL EJIDO_2	24	24	0	1	260	240
U. CATOLICA	17.5	17	0	1	220	205
U. CATOLICA_1	17.5	17	0	3	320	335
TERMINAL TERRESTRE	18	17	0	3	110	125
TERMINAL TERRESTRE_1	18	17	0	3	210	210
TERMINAL TERRESTRE_2	18	17	0	3	350	335
IBARRA ESTADIO	18	18	2	3	20	35
IBARRA ESTADIO_1	18	17	0	0	170	150
IBARRA ESTADIO_2	18	18	0	3	300	315
AZAYA NORTE	23.5	21	0	3	350	340
AZAYA NORTE_1	17.5	17	0	3	100	90
AZAYA NORTE_2	23.5	21	0	3	250	245
TEODORO GOMEZ	17.5	17.5	0	3	30	40
TEODORO GOMEZ_1	17.5	19	0	1	170	140
TEODORO GOMEZ_2	17.5	16.5	0	3	260	230

3.3. Comparación de la red ampliada y optimizada respecto a la red inicial

Luego de haber realizado la simulación de la red con los nuevos sitios agregados y los parámetros de las antenas optimizados, se evaluará el desempeño de la misma comparado con la red inicial. Según los niveles de cobertura y los parámetros SNIR, RSRP, RSRQ y *Throughput* se podrá analizar el porcentaje de cobertura alcanzado, así como el porcentaje de mejora de los parámetros de la red.

3.3.1. Resultado de la optimización del parámetro RSRP

En la Figura 3.5 se puede apreciar el mapa de cobertura y los valores alcanzados por el parámetro RSRP que se logró alcanzar al finalizar el procedimiento de ampliación y optimización de la red LTE de la ciudad de Ibarra.

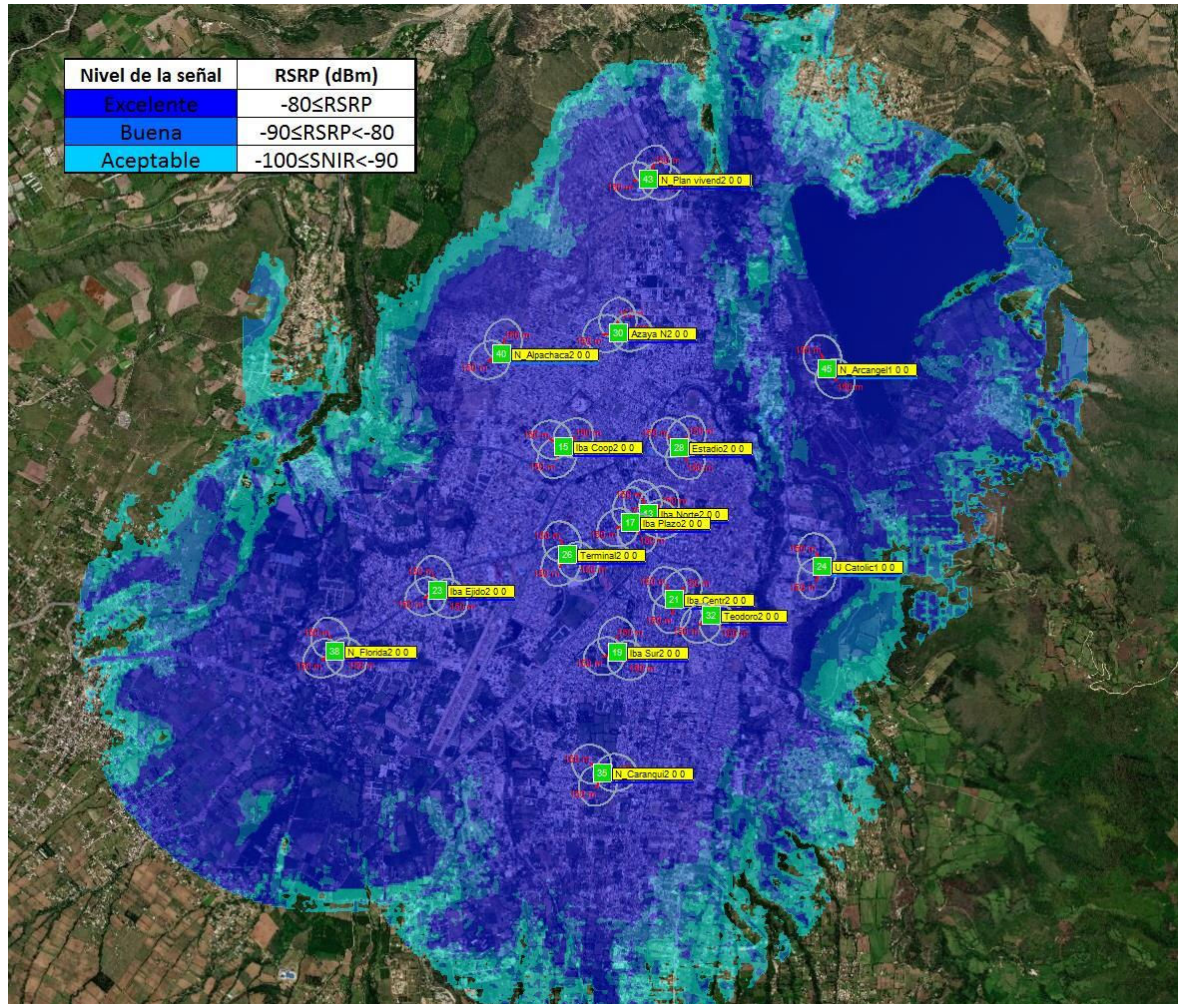


Figura 3.6. Mapa de cobertura RSRP red ampliada y optimizada

Para el análisis del parámetro RSRP en la Tabla 3.3 se indican los distintos niveles de señal de acuerdo con el área cubierta por los mismos.

Tabla 3.3. Cobertura RSRP durante el proceso de ampliación y optimización

Nivel de la señal	Rango	Red inicial		Red Optimizada		Red Ampliada y Optimizada	
	(dBm)	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)
Excelente	≥ -80	21.03	62.47	23.41	67.76	39.54	70.27
Buena	-80 a -90	5.75	17.08	5.49	25.89	9.03	16.05
Aceptable	-90 a -100	6.89	20.45	5.65	16.35	7.7	13.68
Total		33.67	100.00	34.55	100.00	56.27	100.00

En la Figura 3.7 se compara la cobertura de la red inicial, la red luego de ser optimizada y la red final con los nuevos incluidos. En la red optimizada se aprecia el aumento de la cobertura en un 2.61%, en donde en los niveles de señal se obtuvo un aumento de 2.38 Km² para el nivel de señal excelente mientras que los niveles de bueno y aceptable disminuyeron en un 0.26 Km² y 1.24 Km² respectivamente.

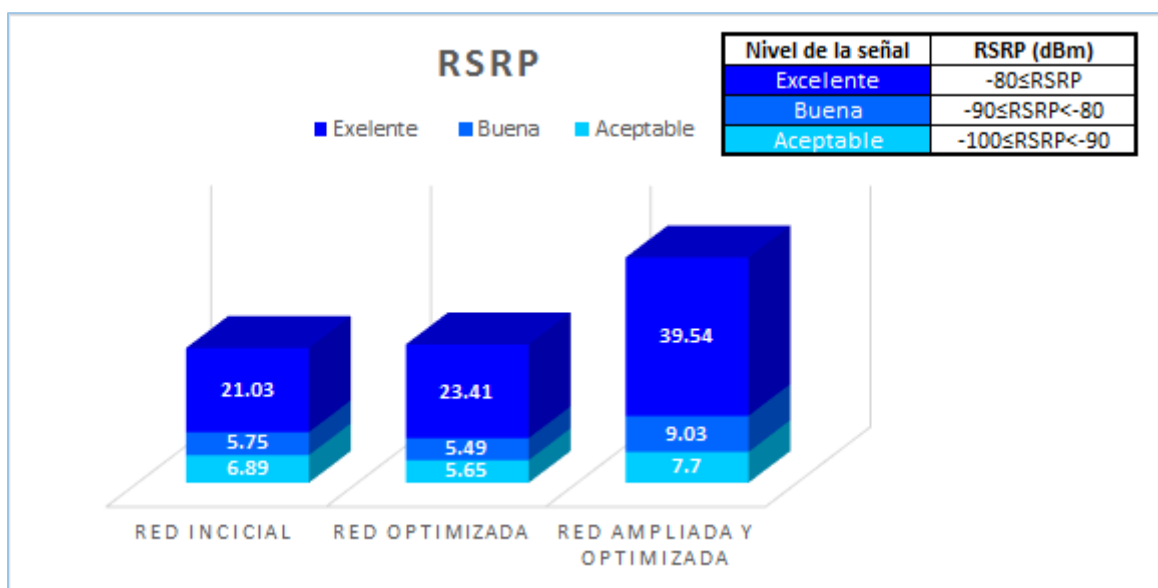


Figura 3.7. Comparación de las áreas de cobertura del parámetro RSRP de las redes

Al realizar la simulación con los nuevos sitios agregados se alcanzó una cobertura total de 56.27 Km² correspondientes al aumento de la cobertura en un 67.12 % teniendo en cuenta la red inicial.

3.3.2. Resultado de la optimización del parámetro SNIR

En la Figura 3.8 se presentan los niveles de interferencia conseguidos luego de optimizar los parámetros de las antenas y la colocación de los nuevos sitios.

En la Tabla 3.4 se presentan los valores de las áreas cubiertas según los niveles SNIR alcanzados por la red inicial, red optimizada y red final.

Tabla 3.4. Cobertura SNIR durante el proceso de ampliación y optimización

Nivel de la señal	Rango	Red inicial		Red Optimizada		Red Ampliada y Optimizada	
	(dB)	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)
Excelente	≥20	4.78	15.10	8.59	25.99	16.85	29.72
Buena	13 a 20	14.34	45.30	13.84	41.85	23.92	42.18
Aceptable	0 a 13	12.54	39.60	10.63	32.16	15.94	28.10
Total		31.66	100.00	33.06	100.00	56.71	100.00

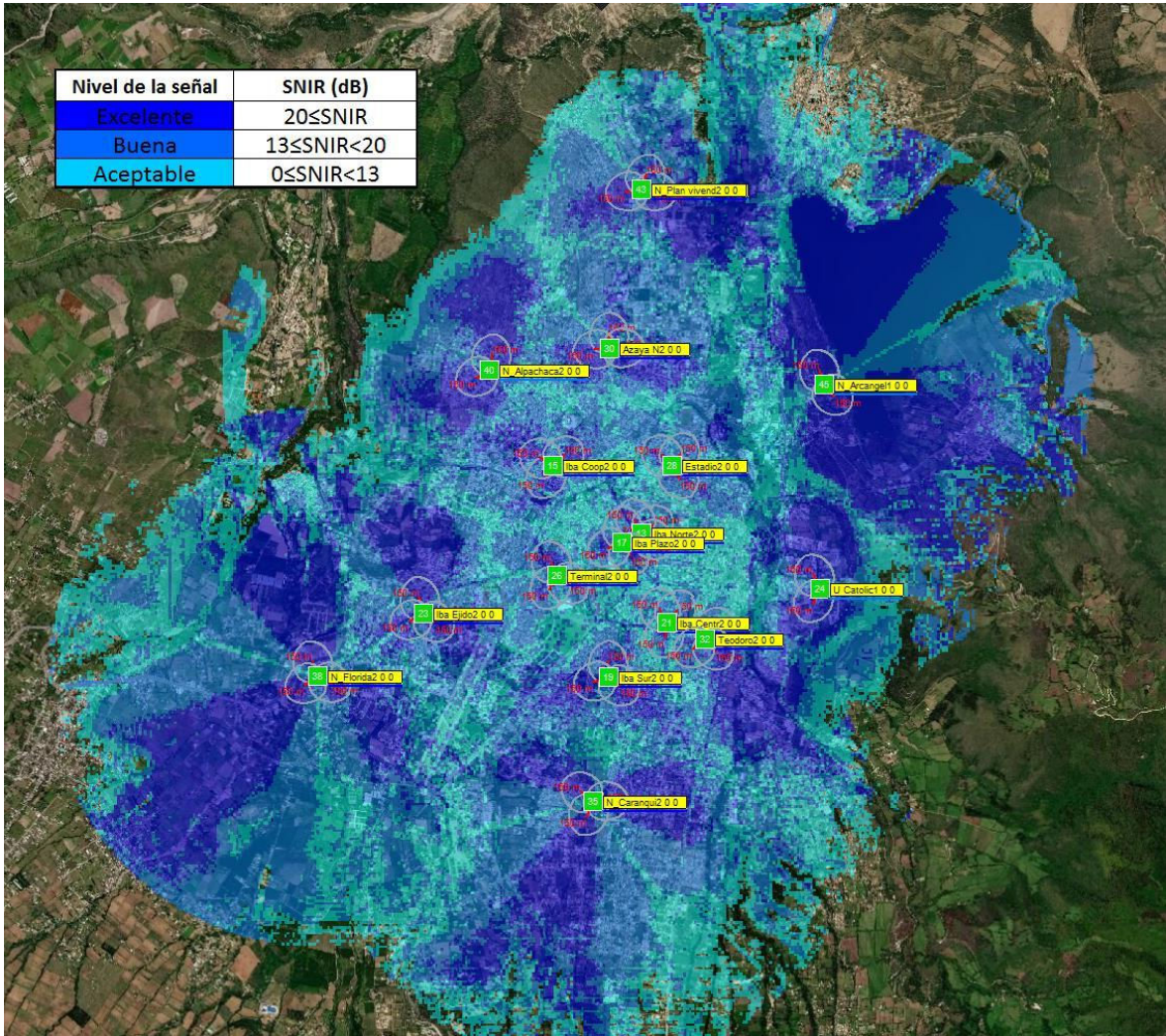


Figura 3.8. Mapa de cobertura SNIR red ampliada y optimizada

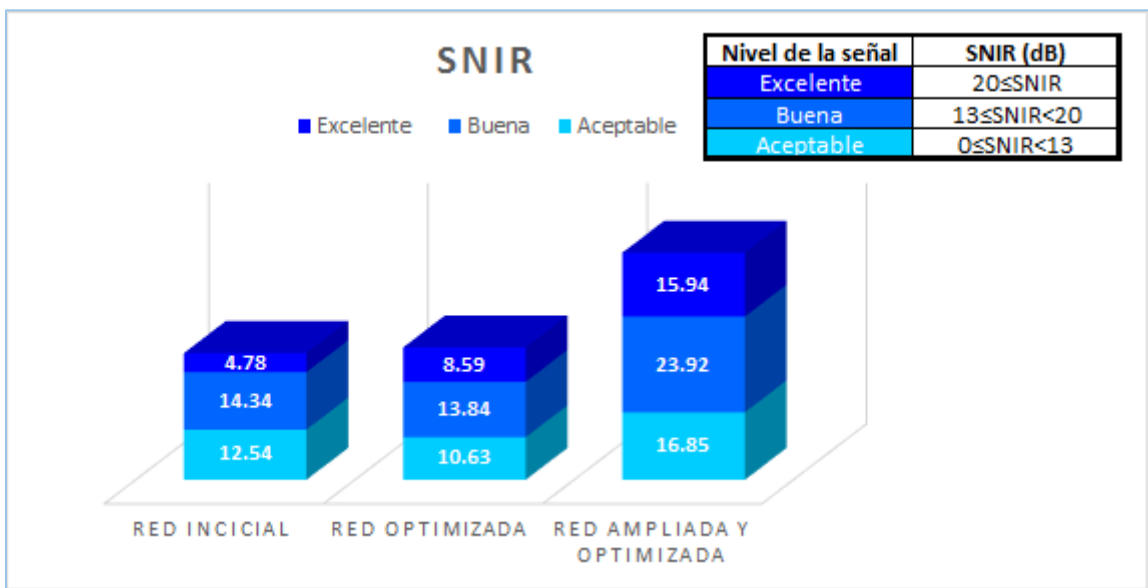


Figura 3.9. Comparación de las áreas de cobertura del parámetro SNIR de las redes

En la Figura 3.9 se esquematizan los valores de las áreas cubiertas por los rangos que definen la calidad de la señal según el parámetro SNIR en las etapas de ampliación y optimización de la red. Al realizar la optimización de la red se logró el incremento 3.81 Km² para el nivel de señal excelente, una disminución de 0.50 Km² para el nivel de señal buena y también para el nivel de señal aceptable se redujo en 1.91 Km².

Adicionalmente, en la red ampliada y optimizada para el nivel de señal excelente comprendido por valores de SNIR superiores a 20 dB, se tiene un área de 16.85 Km². De la misma forma el nivel de señal buena comprendido por valores entre 13 dB y 20 dB se extiende sobre un área de 23.92 Km² y el nivel de señal aceptable con valores entre los 0 dB y 13 dB se encuentra presente en 16.85 Km².

3.3.3. Resultado de la optimización del parámetro *Throughput*

Según la modificación de los parámetros de las antenas de cada uno de los sitios existentes y la colocación de los nuevos sitios en la red se refleja una variación en los niveles de *Throughput* como se puede apreciar en la Figura 3.10.

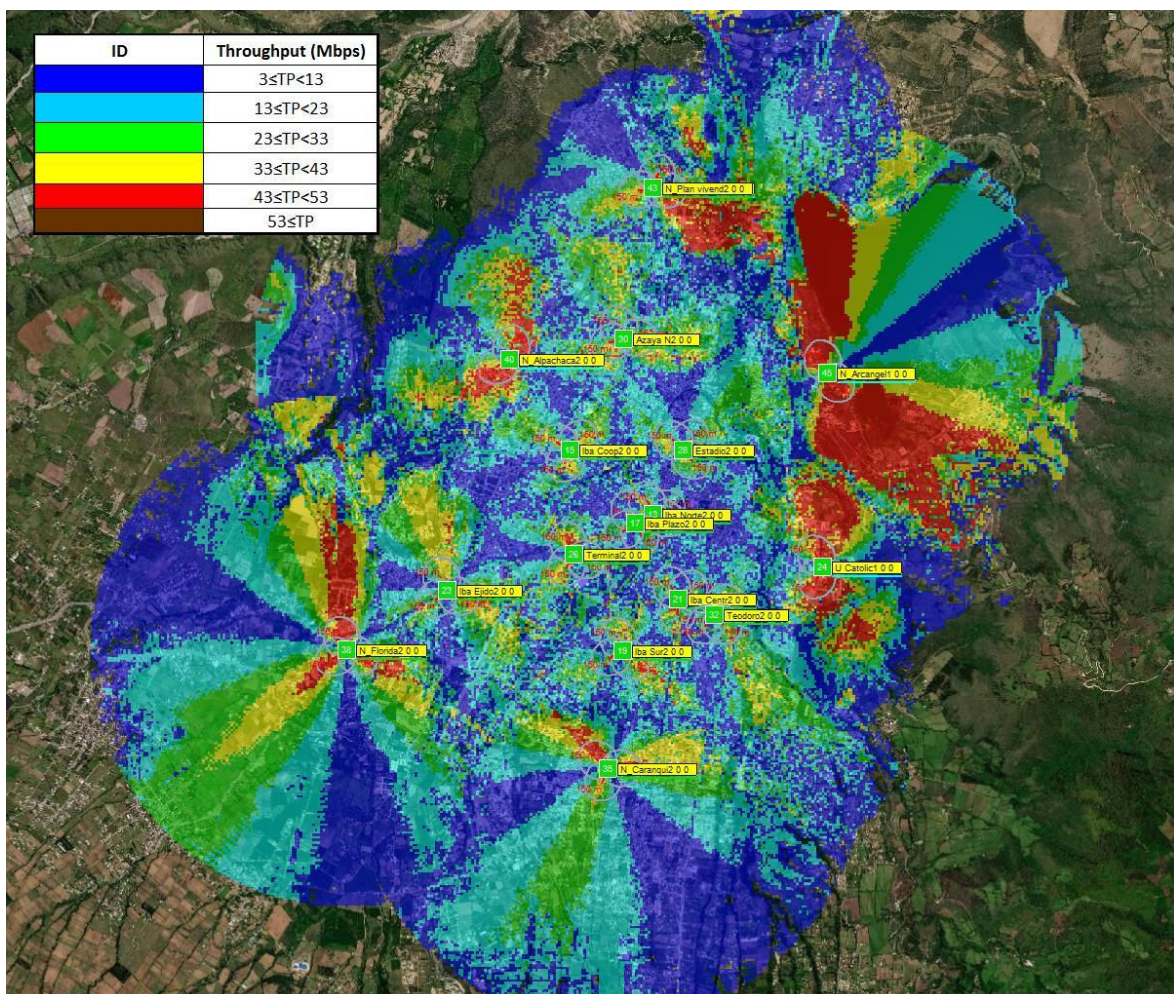


Figura 3.10. Mapa de cobertura de *Throughput* red ampliada y optimizada

La Tabla 3.5 se muestra el área cubierta por los diferentes los niveles de *Throughput* presentes tanto en la red inicial como en la red ampliada y optimizada.

Tabla 3.5. Niveles de *Throughput* en la red inicial y en la red ampliada y optimizada

Rango (Mbps)	Red inicial		Red Optimizada		Red Ampliada y Optimizada	
	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)
3 a 13	17.76	48.53	16.90	45.85	22.67	37.15
13 a 23	12.55	34.28	10.76	29.18	16.33	26.76
23 a 33	4.91	13.41	5.26	14.28	10.40	17.04
33 a 43	1.23	3.36	2.61	7.08	6.79	11.13
43 a 53	0.15	0.42	1.33	3.62	4.83	7.92
53 ≤	0	0	0	0	0	0
Total	36.60	100.00	36.86	100.00	56.60	100.00

En la Figura 3.11 se esquematizan los valores de *Throughput* correspondientes a la red luego de ser ampliada y optimizada. Se aprecia un incremento sustancial en todos los rangos de valores principalmente en el primer rango comprendido entre 43 Mbps y 53 Kbps, aun que la tendencia prevalece en los valores de los niveles más bajos correspondientes entre 13 Mbps y 3 Mbps.

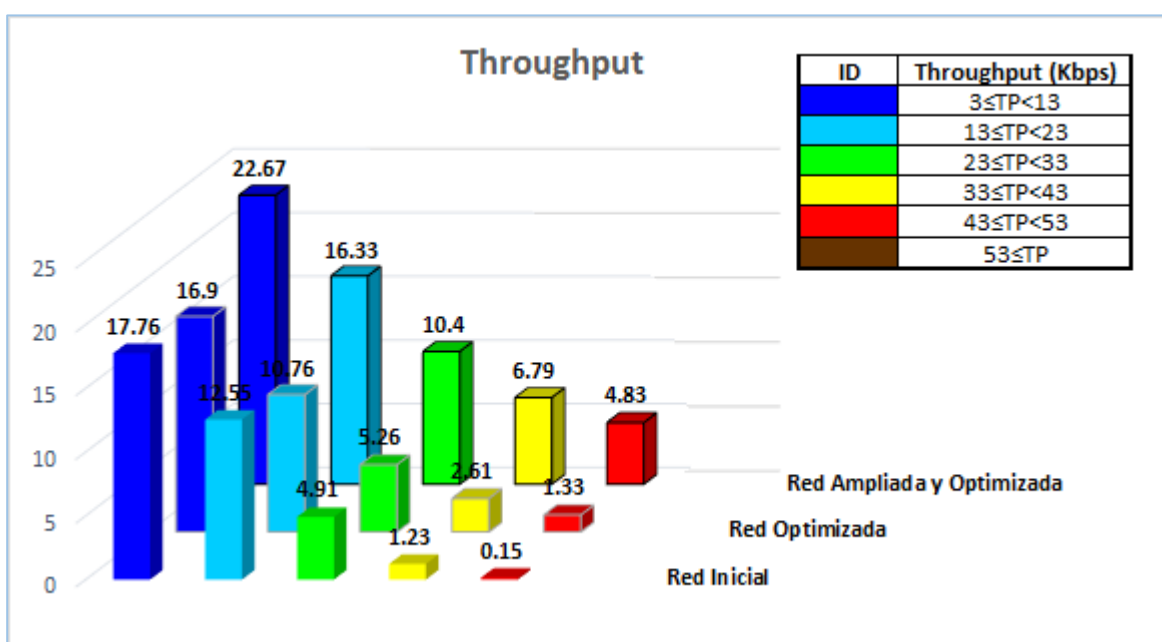


Figura 3.11. Comparación de los niveles de *Throughput* de las redes

De acuerdo con la ubicación de los sitios existentes se tiene cierto solapamiento debido a la insuficiente separación de los sitios que se encuentran en el centro de la ciudad. La cercanía de los sitios hace que exista una mayor interferencia haciendo que los rangos más bajos de *throughput* se concentren en gran parte de la ciudad.

3.3.4. Resultado de la optimización del parámetro RSRQ

Finalmente, en la Figura 3.12 se muestra el mapa de cobertura del parámetro RSRQ, el mismo que se expresa según la relación Carrier to Interference (C/I) en dB.

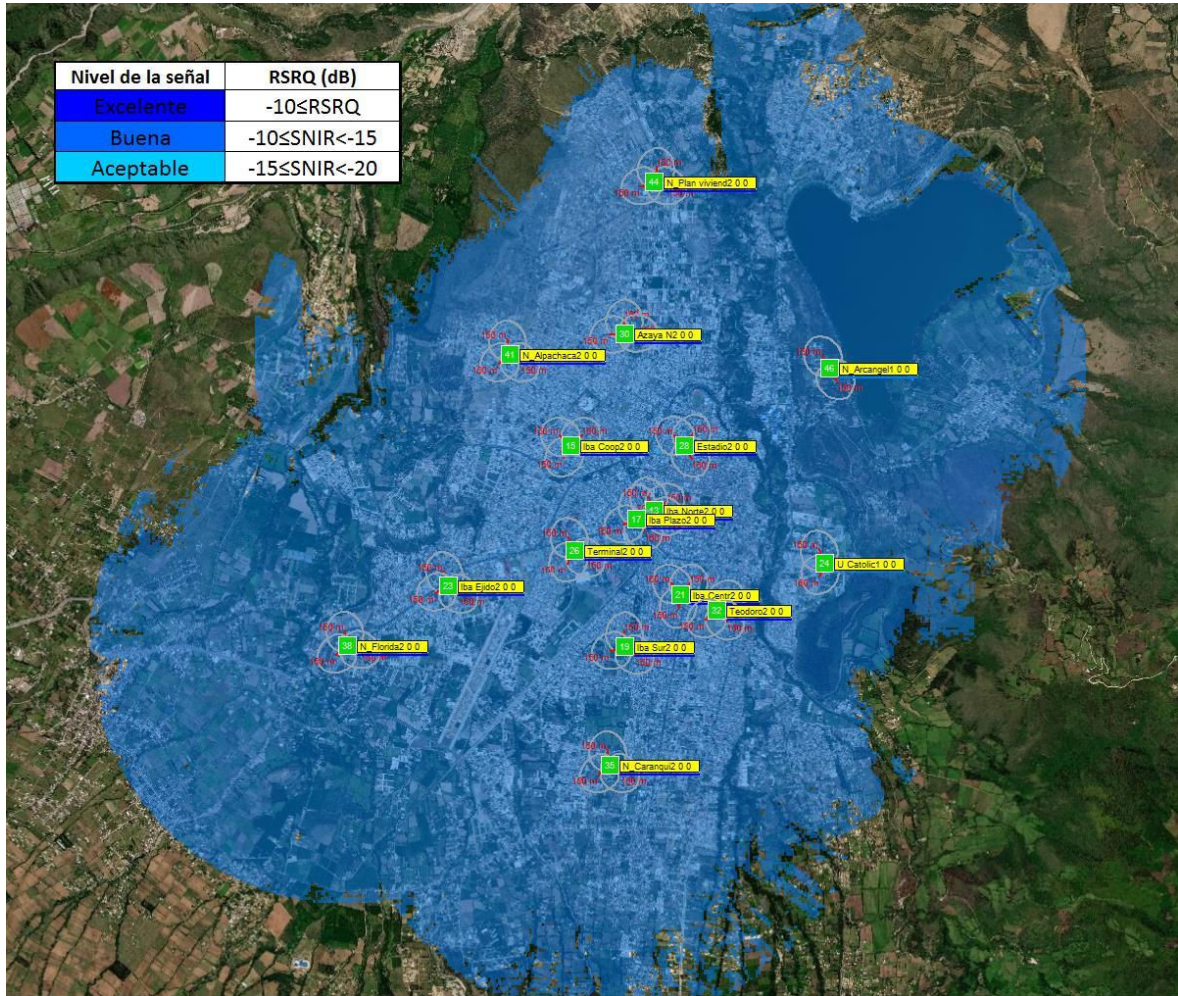


Figura 3.12. Mapa de cobertura de RSRQ red ampliada y optimizada

En la Tabla 3.6 se presentan los valores y los porcentajes de las áreas cubiertas por los distintos valores del RSRQ encontrados tanto en la red en su configuración inicial como en la red luego de realizar el proceso de ampliación y optimización.

Tabla 3.6. Cobertura RSRQ en la red inicial y en la red ampliada y optimizada

Nivel de la señal	Rango	Red inicial		Red Optimizada		Red Ampliada y Optimizada	
	(dB)	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)
Excelente	≥ -10	0	0	0	0	0	0
Buena	-10 a -15	31.62	99.88	33.04	99.97	56.70	99.99
Aceptable	-15 a -20	0.04	0.12	0.02	0.03	0.01	0.01
Total		31.66	100.00	33.06	100.00	56.71	100.00

La mayor parte de la ciudad cuenta con valores de RSRQ de -12 dB y -11 dB, lo cual prevaleció al aumentar la cobertura tal como se muestra en la Figura 3.13.

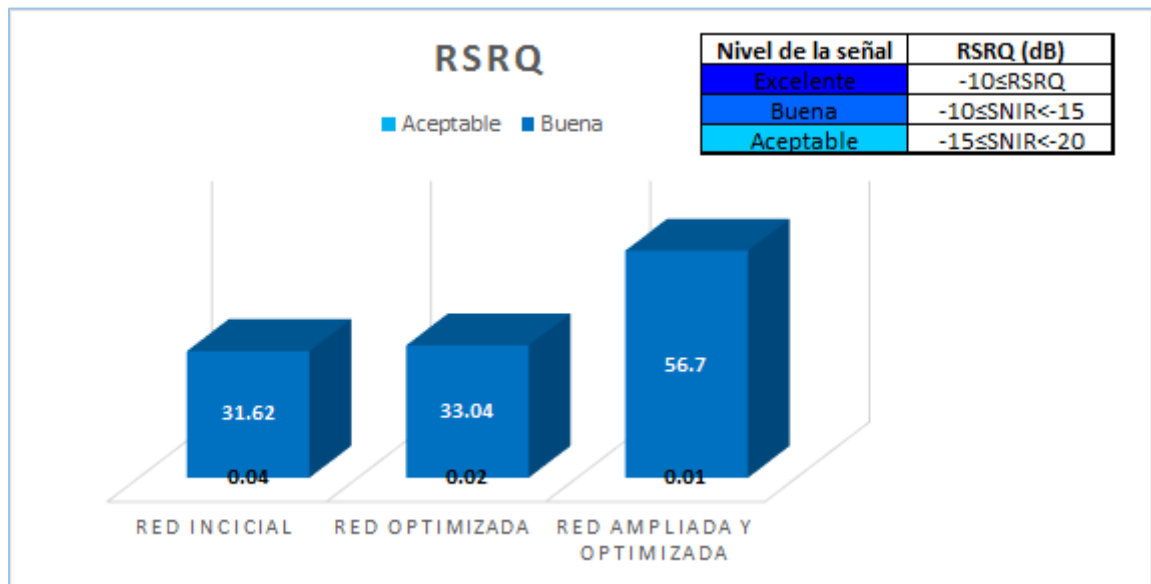


Figura 3.13. Comparación de los rangos del parámetro RSRQ de las redes

Cabe recalcar que según los resultados obtenidos al realizar la simulación de la red en sus distintas etapas de ampliación y optimización. El 99.88 % del área la cobertura de la red inicial contaba con una buena calidad de señal mientras que tan solo el 0.12 % correspondía a una calidad aceptable de señal. En tanto que la red optimizada cuenta con el 99.97 % del área de cobertura con una buena calidad de señal y el 0.03 % del área de cobertura posee una calidad aceptable de señal.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo presenta las conclusiones obtenidas de este trabajo de titulación, además se detallan algunas recomendaciones.

4.1. CONCLUSIONES

Para que la cartografía digital concuerde con las condiciones urbanas y estructurales actuales de la ciudad, se modificó el *clutter* de forma que se añadieron casas, edificios y vías que fueron construidos recientemente que no se encontraban en la cartografía disponible para realizar este proyecto. Por lo tanto, se logró una simulación muchas más apegada a la realidad.

En base a los mapas de cobertura obtenidos, como resultado de la simulación de la red en su estado inicial es posible identificar zonas con cobertura deficiente, así como los niveles de señal que se encuentran presentes dentro del área de cobertura necesario para determinar la configuración que se debe realizar en las antenas existentes y la cantidad necesaria de nuevos de sitios. En este proyecto se puede evidenciar una mejora sustancial luego del proceso de optimización y una mejora mucho mayor luego de incluir los nuevos sitios dentro de la red.

Los niveles de *throughput* obtenidos luego del proceso de ampliación y optimización muestran que la mayor área recae dentro de rangos de *throughput* entre 3 y 23 Mbps según los rangos establecidos para el análisis. A pesar de ello se aprecia que los rangos de los parámetros como el RSRP se tiene un porcentaje de 70.27% donde la calidad de la señal es excelente. Por otro lado, el parámetro SNIR tiene buena señal en el 42.18% del área y excelente señal en el 29.72%. El parámetro RSRQ cuenta con el 99.99% de buena calidad de señal y tan solo el 0.01% donde la calidad de la señal es aceptable.

Después de la ampliación y optimización de la red LTE mediante la configuración de los parámetros de las antenas y la ubicación de nuevos sitios, se han mejorado la cobertura, el nivel de señal y el rendimiento.

El éxito de la red LTE depende de sus tres factores: cobertura, capacidad y calidad. La capacidad se basa en una evaluación de la congestión que se ha eliminado mediante una optimización adecuada. La calidad se ha mejorado al reducir la interferencia de recursos intra e interceldas. En cuanto que la cobertura se incrementó modificando el tilt de las radio bases y añadiendo nuevos sitios en puntos periféricos estratégicos.

HTZ communications es la nueva edición del software de ingeniería de RF del grupo de ATDI. Esta solución de ingeniería y diseño de RF incluye varias características innovadoras

como la planificación automática de redes de radio, motor gis que permite crear información de construcción de alta resolución en ráster a partir de muestras de Modelo Digital de Superficie (DSM). HTZ communications reemplaza a ICS telecom EV el mismo que sucedió a ICS Designer. Esta nueva versión del software garantiza un alto nivel de confiabilidad, disponibilidad y resistencia de las comunicaciones y ayuda a los operadores a lograr una migración sin problemas a la conectividad de banda ancha y las nuevas tecnologías.

4.2. RECOMENDACIONES

Para obtener un análisis más apegado a la realidad se podría hacer uso de mapas digitales con una mayor resolución y que se encuentren actualizados. Puesto que los mapas utilizados fueron actualizados hace varios años atrás, además la resolución del mapa con el que se realizó el análisis no posee una alta resolución ya que se verificó en la base de datos de ATDI que ciertas ciudades cuentan con cartografía con una mayor resolución.

Cuando se realiza la simulación de la red en las fases de ampliación y optimización es importante verificar que los parámetros tanto del *clutter* así como el modelo de propagación se encuentren configurados según lo establecido en el capítulo 2.

En un próximo análisis sobre la calidad de las redes inalámbricas se debería basarse también en los parámetros de calidad establecidos por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), entidad encargada de regular el uso del espectro radioeléctrico y los servicios de telecomunicaciones dentro del territorio ecuatoriano.

Para próximos estudios se podría emplear métodos de optimización adicionales como lo son el análisis de la movilidad y el *handover*, reduciendo la ocurrencia de *handovers* innecesarios y optimizar los parámetros de reelección celular.

Se sugiere el análisis de la ampliación y optimización introduciendo un número aproximado de usuarios a los existentes en la ciudad y comparar los mapas de cobertura en *uplink*. Por lo tanto, quedan muchos desafíos para mejorar la capacidad en el futuro. Además, puede considerarse como una plataforma de planificación de radio estándar para las ciudades densamente pobladas.

Considerando que el agregar un cierto número de radio bases implica un valor económico se podría realizar conjuntamente con la operadora local un análisis costo beneficio para determinar la factibilidad de que en la práctica se añadan las nuevas radio bases.

También se podría realizar un estudio de la relación del LTE con sistemas antiguos como GSM y CDMA, adicionalmente con nuevos sistemas próximos a ser implementados como 5G; teniendo en cuenta algunos parámetros como *handover* y *roaming*.

Como trabajo futuro, un análisis importante se podría extender a la cobertura de radio para el caso de una red 5G. También se podrían analizar en diferentes tipos de áreas, se podría prever la simulación en otros entornos como suburbano y rural.

5. Referencias Bibliográficas

- [1] ETSI, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation". France Patent 3GPP TS 36.211 version 8.9.0 Release 8, June 2010.
- [2] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker, LTE The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice, 2nd ed., Chippenham, Wiltshire: Jhon Wiley and Sons, 2011.
- [3] R. D. Ford, "A Software Testbed For Simulation Of Cellular Wireless Networks," New York, 2012.
- [4] C. Cox, An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications, 1st ed., John Wiley and Sons, 2012.
- [5] R. Ferrús, O. Sallent, G. Baldini and L. Goratti, "LTE: The Technology Driver for Future Public Safety Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 10, pp. 154-161, October 2013.
- [6] M. Olsson, S. Rommer, C. Mulligan, S. Sultana and L. Frid, SAE and the Evolved Packet Core: Driving the Mobile Broadband Revolution, Amsterdam: Academic Press, 2009.
- [7] ETSI, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures". France Patent 3GPP TS 36.213 version 13.0.0 Release 13, May 2016.
- [8] D. C. Alvarez Paredes, "Diseño de una red 4G (Long Term Evolution) en el cluster 2 de la ciudad de Quito para el operador CNT. EP," *Repositorio de la Universidad Tecnica de Ibarra*, 2015.
- [9] E. Dahlman, S. Parkvall and J. Skold, 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2nd ed., Oxford, Oxfordshire: Academic Press, 2014.
- [10] J. García Falaguera, "Diseño de un Plan Nominal para un Sistema LTE Mediante una Herramienta de Planificación Radio Comercial," Barcelona, 2014.
- [11] B. Tirouvengadam, "Enhancement of LTE Radio Access Protocol for Efficient Video Streaming," Ortawa, 2012.
- [12] J. Badu y E. Masum, «End-to-End Delay Performance Evaluation for VoIP in the LTE Network,» Sweden, 2011.
- [13] L. Korowajczuk, LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis, 1st ed., Reston, Virginia: John Wiley and Sons, 2011.
- [14] S. Patar Munda, LTE MAC-RLC-PDCP LTE Protocol Stack, Bengaluru, Karnataka, 2013.
- [15] N. Islam and S. Hossen, "QoS Performance Evaluation of Video Conferencing over LTE," Sweden, 2012.

- [16] Tutorialspoints, "LTE Protocol Stack Layers," [Online]. Available: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_layers_data_flow.htm. [Accessed 29 August 2019].
- [17] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*, New York: Cambridge University Press, 2009.
- [18] A. Hatahet and A. Jain, "Beamforming in LTE FDD for Multiple Antenna Systems," Swedwn, 2018.
- [19] A. S. tanenbaum and D. S. Wetherall, *Computer Networks*, 5th ed., Seattle, Washington: Prentice Hall, 2011.
- [20] Y. Zaki, *Future Mobile Communications: LTE Optimization and Mobile Network Virtualization*, Bremen: Springer Science & Business Media, 2012.
- [21] A.-E. M. Taha, N. A. Ali and H. S. Hassanein, *LTE, LTE-Advanced and WiMAX: Towards IMT-Advanced Networks*, Chennai, India: John Wiley and Sons, 2012.
- [22] Agilent Technologies, *LTE and the Evolution to 4G Wireless Design and Measurement Challenges*, Santa Clara, California: John Wiley and Sons, 2013.
- [23] ETSI, "LTE; Evolve Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management". France Patent 3GPP TS 36.133 version 14.3.0 Release 14, April 2017.
- [24] D. Rai and A. Dwivedi, "LTE Theory to Practice- KPI Optimization (A 4G Wireless Technology)," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 8, no. 2, pp. 1-20, 2018.
- [25] F. Afroz, R. Subramanian, R. Heidary, K. Sandrasegaran and S. Ahmed, "SINR, RSRP, RSSI and RSRQ Measurements in Long Term Evolution Networks," *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, vol. 7, no. 4, pp. 113-123, 2015.
- [26] R. Subramanian, K. Sandrasegaran and X. Kong, "Benchmarking of real-time LTE network in dynamic environment," in *2016 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Sydney, 2016.
- [27] M. La Roca, "RSRQ to SINR Relation," *laroccasolutions*, 2016. [Online]. Available: <https://www.laroccasolutions.com/164-rsrq-to-sinr/>. [Accessed 15 October 2019].
- [28] J.-P. Noël and E. Grenier, "Mixed absorption-diffraction propagation models for wireless proximity networks," *ATDI*, pp. 1-6, 2004.
- [29] G. Espinoza Jiménez, "Proceso de Implementacion de una Radiobase para la Tecnologia de LTE," Mexico, 2016.
- [30] HUAWEI TECHNOLOGIES, "RRU3908 Description," 2012.

- [31] F. Athley and M. Johansson, "Impact of Electrical and Mechanical Antenna Tilt on LTE Downlink System Performance," in *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, Göteborg, 2010.
- [32] HUAWEI TECHNOLOGIES, *Huawei Antenna and Antenna Line Products*, 2014.
- [33] S. Salih and M. Suliman, "Implementation of Adaptive Modulation and Coding Technique using Matlab," *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 2, no. 5, pp. 137-139, 2011.
- [34] ETSI, "LTE; Evolve Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios". France Patent 3GPP TR 36.943 Version 8.4.0 Release 8, July 2012.
- [35] ATDI, "LTE Network Design in ATDI Tools". Patent Technical Support, 2017.
- [36] 3GPP, "Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects". Patent TR 36.819 version 11.2.0 Release 11, September 2013.
- [37] F. García Rueda, "Modelos de Propagación para Comunicaciones Móviles 4G y 5G," Madrid, 2016.
- [38] ATDI, "Radio Propagation in ATDI Tools". Patent Technical support, 2017.
- [39] 3GPP, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Radio Frequency (RF) system scenarios". Patent TR 36.942 version 10.3.0 Release 10, June 2012.
- [40] 3GPP, "UMTS 900 MHz Work Item Technical Report". Patent TR 25.816 version 8.0.0 Release 8, September 2009.
- [41] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, Second ed., Liverpool: John Wiley and Sons, 2000.
- [42] K. Ruščić and A. Skenderović, "Measurements and Propagation Model Tuning in DVB-T2 Network," in *Proceedings ELMAR-2014*, Zagreb, 2014.
- [43] F. Almajanu, C. Nastase, A. Martian and I. Marghescu, "Radio Coverage Analysis for Mobile Communication Network Using ICS Telecom," *Polytechnic University of Bucharest Scientific Bulletin*, vol. 78, no. 2, pp. 177-190, 2016.
- [44] N. Ratnayake, K. Ziri-Castro, H. Suzuki and D. Jayalath, "Deterministic diffraction loss modelling for novel broadband communication in rural environments," in *2011 Australian Communications Theory Workshop*, Melbourne, 2011.
- [45] ATDI, "Clutter attenuations in ATDI Tools". Patent Technical support, 2017.
- [46] 3GPP, "Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception". Patent TS 36.101 version 11.5.0 Release 11, July 2013.
- [47] ATDI, "Interference Rejection Factors". Patent Technical support, 2017.

- [48] L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [49] ETSI, "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Network Architecture". France Patent 3GPP TS 23.002 version 8.7.0 Release 8, January 2011.
- [50] ERC, "Monte Carlo simulation methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems," Geneva, 2017.

ANEXOS

ANEXO A: Hoja de datos del RRU 3908

ANEXO B: Hoja de datos de la Antena *Agisson A19451811*

ANEXO A



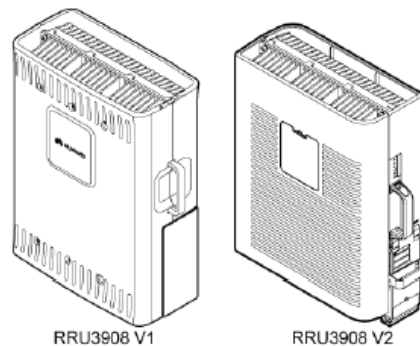
1.1 RRU3908

The RRU3908 is an outdoor RF remote radio unit, which performs modulation, demodulation, data processing, and combining and dividing for baseband signals and RF signals.

1.1.1 Appearance of the RRU3908

Figure 1-1 shows the RRU3908.

Figure 1-1 RRU3908



1.1.2 Ports on the RRU3908

The RRU3908, which has a modular structure, has its external ports located at the bottom of the module and in the cabling cavity.

Ports on the RRU3908 V1

Table 1-1 Ports on the RRU3908 V1

Port	Quantity	Description
CPRI_E	1	Eastward optical or electrical port, 1.25Gbit/s
CPRI_W	1	Westward optical or electrical port, 1.25Gbit/s
EXT_ALM	1	Alarm port
ANT_TX/RXA	1	RF TX/RX port A
ANT_TX/RXB	1	RF TX/RX port B
RX_IN/OUT	1	Inter-RRU port
RET	1	Port for the RET antenna communication



Table 1-2 Buttons and terminals on the RRU3908 V1

Label	Description
RST	Reset button
VSWR	-
RTN+	Terminals for power cables
NEG-	

Ports on the RRU3908 V2

Table 1-3 Ports on the RRU3908 V2

Port	Quantity	Description
TX RX CPRI_0	1	Optical/electrical port 0, 1.25Gbit/s or 2.5Gbit/s
TX RX CPRI_1	1	Optical/electrical port 1, 1.25Gbit/s or 2.5Gbit/s
EXT_ALM	1	Alarm port
ANT_TX/RXA	1	RF TX/RX port A
ANT_TX/RXB	1	RF TX/RX port B
RX_IN/OUT	1	Inter-RRU port
RET	1	Port for the RET antenna communication

Table 1-4 Buttons and terminals on the RRU3908 V2

Label	Description
RTN(+)	Terminals for power cables
NEG(-)	
RTN(+)	Cascaded power supply port
NEG(-)	



1.2 Technical Specifications of the DBS3900

Table 1-9 describes the technical specifications of the DBS3900.

Table 1-9 Technical specifications of the DBS3900

Item	Specification		
RRU3908 V1	Frequency Band	RX Band (MHz)	TX Band (MHz)
	900 MHz	890 to 915	935 to 960
		880~905	925~950
	850 MHz	824 to 849	869 to 894
	1800 MHz	1,710 to 1,755	1,805 to 1,850
		1,740 to 1,785	1,835 to 1,880
	1900 MHz	1,850 to 1,890	1,930 to 1,970
1,870 to 1,910		1,950 to 1,990	
RRU3908 V2	900 MHz	890 to 915	935 to 960
		880 to 915	925 to 960
	850 MHz	824 to 849	869 to 894
Capacity	GSM	BBU3900: S24/24/24 RRU3908 (V1): Each RRU3908 supports six TRXs. RRU3908 (V2, ETSI): Each RRU3908 supports six TRXs. RRU3908 (V2, Class 2): Each RRU3908 supports eight TRXs Each sector supports a maximum of 24 carriers.	
	UMTS	BBU3900: S8/8/8 (1,536 CEs in the UL and 1,536 CEs + 15 × 24 HSDPA codes in the DL) RRU3908: Each RRU3908 supports four TRXs Each sector supports a maximum of eight carriers.	
	GSM+UMTS	BBU3900: GSM S24/24/24+UMTS S8/8/8 (1,536 CEs in the UL and 1,536 CEs + 15 × 24 HSDPA codes in the DL) RRU3908 (V1): G5U1 or G4U2 RRU3908 (V2, ETSI): G3U2 RRU3908 (V2, Class 2): G4U2	

Item	Specification			
Receiver sensitivity	UMTS	-125.5 dBm	As recommended in 3GPP TS25.104, the receiver sensitivity (full band) is measured at the antenna connector on condition that the channel rate reaches 12.2 kbit/s and the BER does not exceed 0.001. Frequency band (MHz): 890 to 915, 935 to 960, 1800 MHz	
		-126.2 dBm	The receiver sensitivity is measured on the center frequency at the antenna connector on condition that 12.2 kbit/s Adaptive Multi Rate (AMR) service is in progress and the BER does not exceed 0.001. Frequency band (MHz): 890 to 915, 935 to 960, 1800 MHz	
		-125.3 dBm	As recommended in 3GPP TS25.104, the receiver sensitivity (full band) is measured at the antenna connector on condition that the channel rate reaches 12.2 kbit/s and the BER does not exceed 0.001. Frequency band (MHz): 880 to 915, 925 to 960	
		-126.0 dBm	The receiver sensitivity is measured on the center frequency at the antenna connector on condition that 12.2 kbit/s Adaptive Multi Rate (AMR) service is in progress and the BER does not exceed 0.001. Frequency band (MHz): 880 to 915, 925 to 960	
	GSM	-113.5 dBm	Frequency band (MHz): 890 to 915, 935 to 960	
		-113.3dBm	Frequency band (MHz): 880 to 915, 925 to 960	
		-113.8 dBm	1800 MHz	
	Transmission port	GSM	GTMU	4 E1s/T1s, 1 FE electrical port, 1 FE optical port
		GSM+UMTS	WMPT	4 E1s/T1s, 1 FE electrical port, 1 FE optical port
			GTMU	4 E1s/T1s, 1 FE electrical port, 1 FE optical port
UTRP2			2 FE/GE optical ports	
UTRP3			8 E1s/T1s	
UTRP4			8 E1s/T1s	
UTRP6			1 STM-1/OC-3 port	
UTRP9			4 FE/GE electrical ports	
UMTS		WMPT	4 E1s/T1s, 1 FE electrical port, 1 FE optical port	
		UTRP2	2 FE/GE optical ports	
	UTRP3	8 E1s/T1s		



Item	Specification		
		UTRP4	8 E1s/T1s
		UTRP6	1 STM-1/OC-3 port
		UTRP9	4 FE/GE electrical ports
Clock synchronization	Line clock, GPS clock, BITS clock, clock of the Oven Controlled Crystal Oscillator (OCXO) in free-run mode, and IP clock		
Dimension (H x W x D)	BBU3900: 86 mm × 442 mm × 310 mm RRU3908: 485 mm × 380 mm × 170 mm (with the housing) RRU3908: 480 mm × 356 mm × 140 mm (without the housing)		
Weight	BBU3900 ≤ 12 kg (in full configuration) BBU3900 ≤ 7 kg (in typical configuration) RRU3908: 21 kg (without the housing) RRU3908: 23 kg (with the housing)		
Input power	BBU3900: -48 V DC; voltage range: -38.4 V DC to -57 V DC RRU3908: -48 V DC; voltage range: -36 V DC to -57 V DC		



Item	Specification				
Power consumption	RRU3908 V1, 900MHz, Class2	Configuration	Output Power per Carrier (W)	Typical Power Consumption (W)	Maximum Power Consumption (W)
	GSM	3 × 2	20	760	910
		3 × 4	20	730	1,070
		3 × 6	12	730	1,070
	GSM+UMTS	GSM 3 × 2 + UMTS 3 × 1	20/20	870	1,090
		GSM 3 × 4 + UMTS 3 × 1	10/20	820	1,050
		GSM 3 × 4 + UMTS 3 × 2	10/10	820	1,050
	UMTS	3 × 1	20	490	590
		3 × 2	20	640	790
		3 × 3	20	880	1,100
		3 × 4	15	880	1,110
	RRU3908 V1, 900MHz, ETSI	Configuration	Output Power per Carrier (W)	Typical Power Consumption (W)	Maximum Power Consumption (W)
	GSM	3 × 2	20	650	840
		3 × 4	10	790	980
		3 × 6	10	1,000	1,350
	GSM+UMTS	GSM 3 × 1 + UMTS 3 × 1	20/20	770	890
		GSM 3 × 2 + UMTS 3 × 1	10/20	810	990
		GSM 3 × 3 + UMTS 3 × 1	10/20	890	1,130
	RRU3908 V2, 900MHz/850 MHz, Class2	Configuration	Output Power per Carrier (W)	Typical Power Consumption (W)	Maximum Power Consumption (W)
	GSM	3 × 2	20	510	670
		3 × 4	20	780	1,180
		3 × 6	15	740	1,150



Item	Specification					
	GSM+UMTS	GSM 3 x 2 + UMTS 3 x 1	20/40	900	1,170	
		GSM 3 x 3 + UMTS 3 x 1	15/40	870	1,160	
		GSM 3 x 4 + UMTS 3 x 1	13/40	870	1,170	
	UMTS	3 x 1	20	400	490	
		3 x 2	20	550	720	
	RRU3908 V2, 900MHZ, ETSI	Configuration	Output Power per Carrier (W)	Typical Power Consumption (W)	Maximum Power Consumption (W)	
	GSM	3 x 2	20	510	670	
		3 x 4	20	720	1,130	
		3 x 6	10	600	930	
	GSM+UMTS	GSM 3 x 2 + UMTS 3 x 1	20/40	880	1,150	
		GSM 3 x 3+ UMTS 3 x 1	10/40	780	1,050	
	UMTS	3 x 1	20	400	490	
		3 x 2	20	550	720	
	NOTE <ul style="list-style-type: none"> • The typical power consumption for GSM is reached when the base station works with 30% load and power control and DTX are enabled. The maximum power consumption for GSM is reached when the base station works with 100% load. • The typical power consumption for UMTS is reached when the base station works with 50% load. The maximum power consumption for UMTS is reached when the base station works with 100% load. • The GSM output power per carrier is sharing power in compliance with the specifications for multi-carrier base station (Class2). • The GSM output power per carrier is non-sharing power in compliance with ETSI. 					
	Operating temperature	BBU3900	-20°C to +55°C			
RRU3908		-40°C to +45°C (with solar radiation)				
		-40°C to +50°C (without solar radiation)				
Relative humidity	BBU3900	5% RH to 95% RH				
	RRU3908	5% RH to 100% RH				



Item	Specification	
Air pressure	70 kPa to 106 kPa	
Protection rating	BBU3900	IP20
	RRU3908	IP65
Max distance	40km (between BBU and RRU)	
Storage	ETSI EN300019-1-1 class1.2 "Weather protected, not temperature-controlled storage locations"	
Transportation	ETSI EN300019-1-2 class 2.3 "Public transportation"	
Anti-seismic performance	IEC 60068-2-57 (1999-11) Environmental testing -Part 2-57: Tests -Test Ff: Vibration-Time-history method	
EMC	<p>The DBS3900 meets the Electro Magnetic Compatibility (EMC) requirements and complies with the following standards:</p> <ul style="list-style-type: none"> • R&TTE Directive 1999/5/EC • R&TTE Directive 89/336/EEC • ETSI EN 301489-1/8/23 • 3GPP TS 25.113 • ETSI EN 301908-1 • ITU-T SM 329-10 • FCC PART15 	

ANEXO B

DX-1710-2200-65-18i-M

Model: A19451811



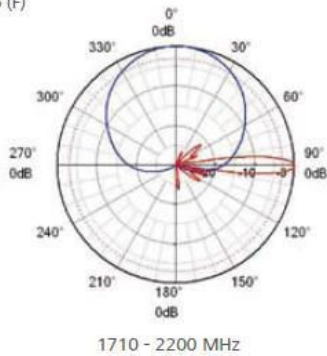
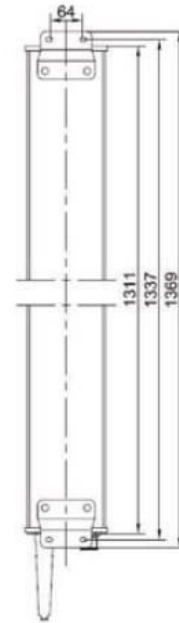
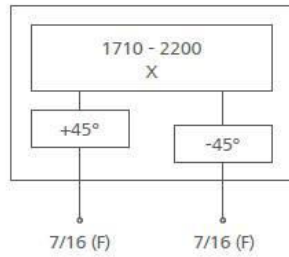
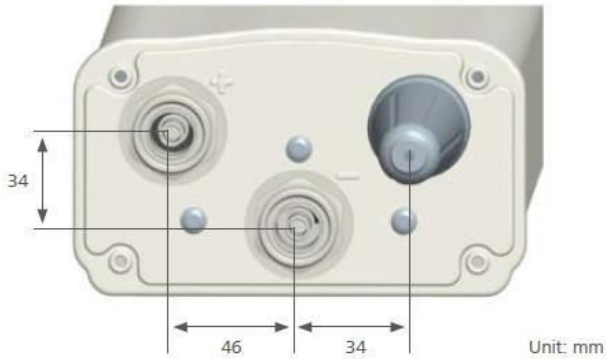
Electrical Properties												
Frequency range (MHz)	1710 - 2200											
	1710 - 1880			1850 - 1990			1920 - 2170			2170 - 2200		
Polarization	+45°, -45°											
Electrical downtilt (°)	0 - 10, continuously adjustable											
Gain (dBi)	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°
	17.2	17.6	17.4	17.7	18.0	17.7	18.0	18.1	17.9	18.0	18.2	17.9
Side lobe suppression for first side lobe above main beam (Typ.) (dB)	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°
	20	16	18	20	20	18	18	17	16	18	18	16
Horizontal 3dB beam width (°)	67			64			61			60		
Vertical 3dB beam width (°)	7.5			7.0			6.7			6.2		
VSWR	< 1.5											
Isolation between ports (dB)	≥ 30											
Front to back ratio, copolar (dB)	Typ. 30											
Cross polar ratio (dB)	0°	Typ. 22										
	± 60°	≥ 10										
Max. power per input (W)	300 (at 50°C ambient temperature)											
Intermodulation IM3 (dBc)	≤ -153 (2 x 43 dBm carrier)											
Squint (°)	Avg. 1.2											
Tracking (dB)	Avg. 1.2 (within 10dB HBW)											
Impedance (Ω)	50											
Grounding	DC Ground											

Mechanical Properties	
Antenna dimensions (H x W x D) (mm)	1311 x 155 x 89
Antenna net weight (kg)	6.2
Mast diameter supported (mm)	38 - 115
Radome material	Fiberglass
Radome colour	Light grey
Operational temperature (°C)	-55 .. +65
Wind load (N)	Frontal: 315 (at 150 km/h) Lateral: 155 (at 150 km/h) Rear side: 360 (at 150 km/h)
Max. operational wind speed (km/h)	150
Survival wind speed (km/h)	200
Connector	2 x 7/16 DIN Female
Connector position	Bottom



DX-1710-2200-65-18i-M

Model: A19451811



NOTE

Extraordinary operating conditions, such as heavy icing or storm wind, may result in the breakage of an antenna. These facts must be considered during the site planning process.

The installation team must be properly qualified and also be familiar with the relevant national safety regulations.

Copyright © Huawei Technologies Co., Ltd. 2014. All rights reserved.

THIS DOCUMENT IS FOR INFORMATION PURPOSE ONLY, AND DOES NOT CONSTITUTE ANY KIND OF COMMITMENT.

HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD.

Huawei Industrial Base
Bantian Longgang
Shenzhen 518129, P.R. China
Tel: +86-755-28780808

ORDEN DE EMPASTADO