



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD TÉCNICA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Estudio para la optimización del uso de la tecnología de la red móvil en la banda 700 MHz y
1700/2100 MHz para mejorar la cobertura en la ciudad de Milagro.**

AUTOR:

Robles Mosquera, Ninibeth Alejandra

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de INGENIERÍA EN

TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

Ing. Bohórquez Heras, Daniel Bayardo

Guayaquil, Ecuador

3 de marzo del 2026



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **ROBLES MOSQUERA NINIBETH ALEJANDRA**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniería en Telecomunicaciones**.

TUTOR

f. _____
Ing. Daniel Bayardo Bohórquez Heras, MS,c.

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____
Ing. Celso Bayardo Bohórquez Escobar, Ph.D.

Guayaquil, a los 3 días del mes de marzo del año 2026



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ROBLES MOSQUERA NINIBETH ALEJANDRA**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Estudio para la optimización del uso de la tecnología de la red móvil en la banda 700 MHz y 1700/2100 MHz para mejorar la cobertura en la ciudad de Milagro** previo a la obtención del título de **Ingeniería en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 3 días del mes de marzo del año 2026

EL AUTOR

f. Ninibeth Robles.

ROBLES MOSQUERA NINIBETH ALEJANDRA.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, **ROBLES MOSQUERA NINIBETH ALEJANDRA**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Estudio para la optimización del uso de la tecnología de la red móvil en la banda 700 MHz y 1700/2100 MHz para mejorar la cobertura en la ciudad de Milagro**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 3 días del mes de marzo del año 2026

EL AUTOR:

f. Ninibeth Robles.

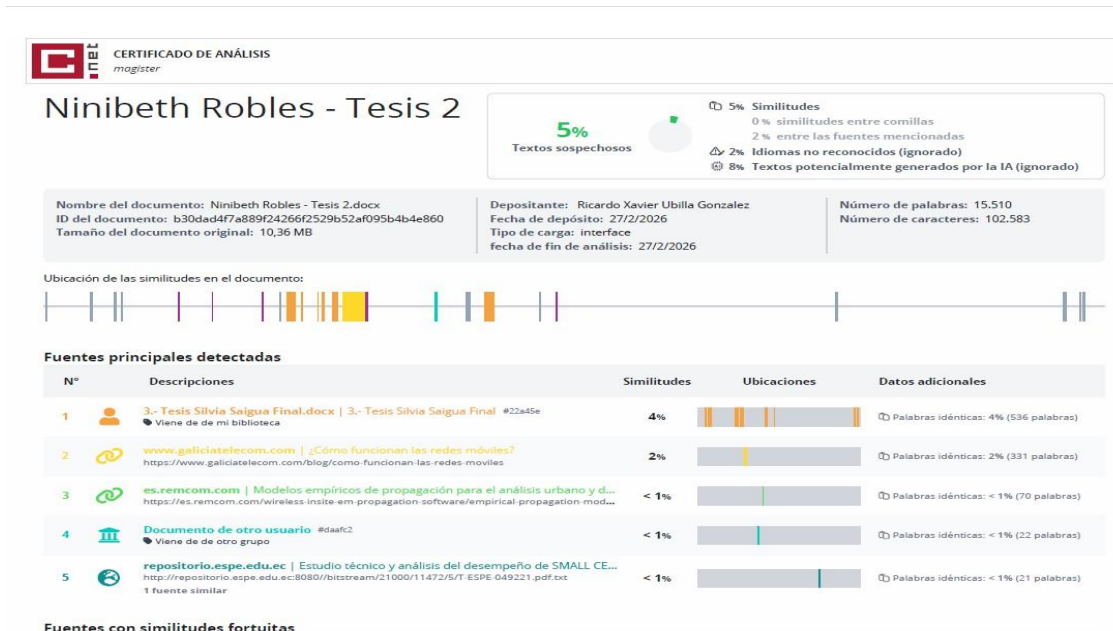
ROBLES MOSQUERA NINIBETH ALEJANDRA



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERIA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICADO COMPILATIO



Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación, “**Estudio para la optimización del uso de la tecnología de la red móvil en la banda 700 MHz y 1700/2100 MHz para mejorar la cobertura en la ciudad de Milagro**”, presentado por el estudiante **Robles Mosquera Ninibeth Alejandra**, de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, donde obtuvo del programa COMPILATIO, el valor de **5%** de coincidencias, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

TUTOR

f. _____
Ing. Daniel Bayardo Bohórquez Heras, MsC.

DEDICATORIA

Llegar a este punto no significa únicamente cerrar un documento, sino concluir una etapa llena de aprendizaje, retos y crecimiento personal. Esta página representa el reconocimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este proceso, pues más allá del cansancio y el alivio del momento, permanece una gratitud profunda nacida del esfuerzo compartido y del camino recorrido.

A mi madre **Lisbel Analena Mosquera Pambabay**, tu amor, apoyo y sacrificio en mi camino educativo me han llevado a escribir esta tesis. Has sido una gran inspiración para mí. Tus palabras de aliento han sostenido mi mano. Gracias por ser mi luz en momentos de oscuridad y la voz en mi vida que me decía hasta dónde podía llegar; tu confianza en mí me mantuvo en marcha.

A mi papá, **Wilmer Rafael Robles Álvarez**, gracias a tu constante ejemplo; me has mostrado que la disciplina y la responsabilidad son rutas seguras hacia el éxito. Por todas las madrugadas y noches que esperaste a que regresara de la universidad para llevarme a casa. Tu silencio lleno de sabiduría, tu fe en mí durante todo este tiempo, incluso a través de muchas de las caídas que he sufrido, siempre me apoyaste.

A mis hermanas **Lisymeiner Robles y Emily Robles**, mis mayores ejemplos de superación profesional, gracias por inspirarme a ser como ustedes, por nunca dejarme sola.

Este trabajo nació del esfuerzo, las noches largas y los momentos de duda, demostrando que la perseverancia transforma las dificultades en logros y que, a veces, es necesario aprender a caminar solo para descubrir la propia fuerza y culminar el camino bajo la luz del esfuerzo personal.

AGRADECIMIENTO

Quiero comenzar agradeciendo a Dios, por darme la fortaleza necesaria para no rendirme, por sostenerme en los momentos de cansancio y por guiar cada uno de mis pasos hasta alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

A mi abuelita **Rosa Isaura Álvarez**, que desde hace muchos años se convirtió en uno de mis ángeles en el cielo. Aunque el tiempo haya pasado, tu recuerdo sigue intacto en mi corazón. Este triunfo también es para ti, porque fuiste, eres y siempre serás mi mayor inspiración y la fuerza que me impulsa a seguir adelante. A mis ángeles del cielo, que sé que me acompañan y me cuidan desde arriba. Su recuerdo vive en mí y me da la fuerza para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mí amiga **Joselin Pincay**, gracias por tu apoyo sincero, por escucharme cuando el estrés me vencía y por darme ánimos para continuar. Tu amistad ha sido un pilar importante en este proceso.

A mí amigo **Diego Piguave**, gracias por tu paciencia, comprensión y compañía constante. Por creer en mí, por motivarme y por estar presente en cada etapa de este camino.

Hoy culmino esta etapa con el corazón lleno de gratitud, dedicando este logro a quienes me acompañan en la tierra y a quienes me cuidan desde el cielo.

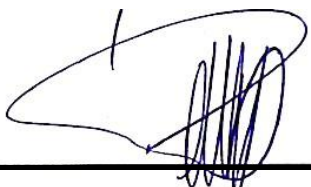


**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACION TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

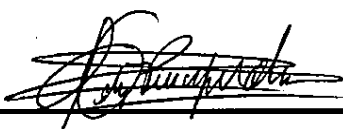
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

Ing. Celso Bayardo Bohórquez Escobar, PhD.
DIRECTOR DE CARRERA

f. 

Ing. Ricardo Xavier Ubilla Gonzalez, MsC.
COORDINADOR DEL ÁREA

f. 

Ing. Kety Jenny Peñafiel Olivo, MSC.
OPONENTE

Índice General

RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	2
<i>1.1 Introducción</i>	<i>2</i>
<i>1.2 Antecedentes</i>	<i>3</i>
<i>1.3 Definición de Problema</i>	<i>5</i>
<i>1.4 Justificación</i>	<i>7</i>
<i>1.5 Objetivos</i>	<i>8</i>
<i>1.5.1 Objetivo General</i>	<i>8</i>
<i>1.5.2 Objetivos Específicos</i>	<i>8</i>
<i>1.6 Hipótesis</i>	<i>9</i>
<i>1.7 Metodología de la Investigación</i>	<i>9</i>
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	11
<i>2.1 Red Móvil</i>	<i>11</i>
<i>2.1.2 Evolución de las redes móviles</i>	<i>11</i>
<i>2.1.3 Primera generación - 1G:</i>	<i>12</i>
<i>2.1.4 Segunda Generación - 2G</i>	<i>13</i>
<i>2.1.5 Tercera generación - 3G</i>	<i>14</i>
<i>2.1.6 Cuarta generación – 4G</i>	<i>15</i>
<i>2.1.7 Cómo se realiza la Comunicación en una Red móvil</i>	<i>17</i>

2.1.8	<i>Tipos de Redes móviles</i>	18
	<i>LTE utiliza:</i>	19
2.1.9	<i>Arquitectura de Red 4G LTE</i>	19
2.1.10	<i>Parámetros de Rendimiento en LTE</i>	20
2.1.11	<i>RSRP (Potencia del Señal de Referencia Recibida)</i>	21
	<i>Valores comunes (3GPP, 2023):</i>	21
2.1.12	SINR	21
2.1.13	<i>Throughput</i>	21
2.1.14	<i>Modelo de Propagación en Espacio Libre</i>	22
2.2	<i>Espectro Radioeléctrico</i>	22
2.2.1	<i>Estación base o Radiobase</i>	23
2.2.2	<i>Componentes de una Radiobase</i>	24
2.3.	<i>Modelos de Propagación de Onda</i>	24
2.3.1	<i>Okumura Hata</i>	25
2.3.2	<i>Recuento de Paredes</i>	26
2.4	<i>Software de Simulación</i>	26
2.4.2	QGIS	27
CAPITULO III: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED MOVIL 4G		29
3.1.	<i>Diagnóstico de la Cobertura Actual de la red móvil 4G en el cantón de Milagro</i>	29
3.1.1.	<i>Análisis de la Situación Actual de la Red en el cantón de Milagro</i>	33
3.2	<i>Detección de Factores de Tipo Técnico o Geográfico que Influyen en la Cobertura</i>	34
3.2.1.	<i>Factores Geográficos</i>	34

3.2.2.	<i>Factores Técnicos</i>	35
3.2.3.	<i>Efecto de la Infraestructura y las Condiciones del Entorno</i>	35
3.3	<i>Evaluación de las Tecnologías y las Soluciones Presentes</i>	36
3.3.1	<i>Implementación de Small Cells</i>	36
3.3.2	<i>Repetidores de Señal (Relay Stations)</i>	37
3.3.3	<i>Extensión de Cobertura con Redes Satelitales</i>	38
3.3.4	<i>Implementación de Redes Mesh</i>	39
3.4	<i>Selección de la Solución Técnica para la Optimización de la Cobertura 4G en el Cantón Milagro</i>	40
3.5	<i>Diseño de Propuesta de Optimización de la red 4G en el cantón Milagro</i>	41
3.5.1	<i>Criterios Técnicos para el Diseño de la Red</i>	41
	• <i>Sobre el uso de bandas de frecuencia:</i>	41
	• <i>Tipos de celdas:</i>	41
	• <i>Densificación de nodos:</i>	42
	• <i>Compatibilidad con la infraestructura ya existente:</i>	42
3.5.2	<i>Ubicación Propuesta de las Small Cells</i>	42
3.5.3	<i>Parámetros Técnicos del Diseño Propuesto</i>	43
3.5.4	<i>Arquitectura General de la Red Propuesta</i>	43
3.6.	<i>Operación de variables</i>	43
3.7.	<i>Criterios Técnicos de Evaluación</i>	44
3.8	<i>Simulación de la Red Propuesta mediante Software (QGIS / Radio Mobile)</i>	45
3.8.1	<i>Metodología de Simulación</i>	45
3.8.2	<i>Modelo Digital de Elevación (DEM)</i>	45

3.8.3	<i>Configuración del Entorno y Procedimiento de Simulación.....</i>	<i>46</i>
CAPITULO IV: RESULTADOS, ANÁLISIS Y PRESUPUESTO DE LA PROPUESTA		47
4.1	<i>Resultados de la simulación de la red actual.....</i>	<i>47</i>
4.1.1	<i>Evaluación de Cobertura (RSRP)</i>	<i>48</i>
4.1.2	<i>Análisis Técnico de Cobertura.....</i>	<i>49</i>
4.1.3	<i>Interpretación técnica.....</i>	<i>50</i>
4.2	<i>Evaluación de la mejora en la red de acceso mediante la implementación de Small Cells</i>	<i>50</i>
4.3	<i>Análisis comparativo del desempeño de la red</i>	<i>52</i>
4.5.	<i>Resultados de la simulación real de la red</i>	<i>55</i>
4.5.1	<i>Mejora en Cobertura (RSRP).....</i>	<i>55</i>
4.6	<i>Evaluación de Capacidad y Eficiencia Espectral.....</i>	<i>56</i>
4.7	<i>Impacto Social y Económico</i>	<i>56</i>
4.7.1	<i>Presupuesto estimado de la propuesta</i>	<i>56</i>
4.7.2	<i>Análisis Social.....</i>	<i>58</i>
4.8	<i>Análisis de Viabilidad Técnica y Económica.....</i>	<i>59</i>
4.8.1	<i>Análisis Preliminar</i>	<i>59</i>
4.8.2	<i>Perspectiva de Proyección Financiera</i>	<i>59</i>
4.8.3	<i>Caracterización y Demanda del Mercado</i>	<i>60</i>
4.8.4	<i>Plan Organizacional y Operativo</i>	<i>60</i>
4.8.5	<i>Revisión de Datos.....</i>	<i>61</i>
4.8.6	<i>Toma de Decisión</i>	<i>61</i>
4.9	<i>Plan de Mantenimiento de la Red.....</i>	<i>62</i>

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES	64
<i>Conclusiones</i>	64
<i>Recomendaciones</i>	66
<i>Bibliografía</i>	67

Índice de Tablas

Tabla 1 Características de Primera Generación de Redes Móviles	12
Tabla 2. Características de Segunda Generación de Redes Móviles.....	13
Tabla 3. <i>Características Técnicas de la Tecnología 3G</i>	14
Tabla 4. Características de la Tecnología 4G.....	15
Tabla 5. <i>Ventajas y Desventajas de implementar Small Cells</i>	37
Tabla 6. Ventajas y Desventajas de Implementar repetidores de señal	38
Tabla 7. <i>Ventajas y Desventajas de Implementar la extensión de redes satélites</i>	38
Tabla 8. Ventajas y Desventajas de Implementar redes Mesh.	39
Tabla 9. Distribución espacial	51
Tabla 10. Costos de Equipamiento.....	57
Tabla 11. Costos de instalación y configuración de la red optimizada.....	58
Tabla 12. Plan de Mantenimiento de Equipos e Infraestructura de la Red Propuesta	62

Índice de Figuras

Figura 1. Cobertura 4G CNT en el cantón de Milagro.....	6
Figura 2. La evolución de las tecnologías de telefonía móvil	16
Figura 3. Arquitectura EPC de LTE (plano de control y plano de datos).	19
Figura 4. Composición des espectro electromagnético	23
Figura 5. Componentes de una Radiobase.....	24
Figura 6. Modelo de Propagación por Recuento de Paredes.....	26
Figura 7. Cobertura 4G CNT en el cantón de Milagro	30
Figura 8. Cobertura 4G Claro en el cantón de Milagro.....	31
Figura 9. Cobertura 4G Movistar en el cantón de Milagro	31
Figura 10. Situación actual de nodos cercanos del cantón Milagro.	32
Figura 11. Modelo Digital de Elevación (DEM) del cantón Milagro utilizado en la metodología de simulación.	46
Figura 12. Simulación de la red actual y cobertura por sectores de las estaciones base en el área de estudio.....	47
Figura 13. Mapa de cobertura RSRP antes de la optimización en el cantón Milagro.....	49
Figura 14. Mejora de la red de acceso LTE mediante la implementación de Small Cells en el área urbana del cantón Milagro.....	50
Figura 15. Mapa de cobertura RSRP después de la implementación de Small Cells	54

RESUMEN

La meta de este estudio es desarrollar y evaluar una propuesta para mejorar la red móvil 4G en el cantón Milagro, en la provincia de Guayas, Ecuador, con el propósito de elevar los niveles de cobertura, la calidad de la señal y la capacidad del servicio en zonas urbanas y periurbanas.

El diagnóstico inicial identificó sectores con una potencia de señal recibida (RSRP) cercana al límite operativo mínimo, índices bajos de relación señal a interferencia (SINR), un fenómeno asociado con un bajo rendimiento y experiencia del usuario mientras la cobertura 4G permanece en el área central del cantón. Las estaciones base utilizadas tienen una cobertura que se extiende de 2.7 km a 3.75 km desde el núcleo urbano y, por lo tanto, generan pérdidas de trayectoria estimadas de 110 a 130 dB, ocurriendo en gran medida a la frecuencia de 1700 MHz.

Tras el estudio técnico y geográfico, se propuso una solución centrada en la implementación táctica de Small Cells. Es importante mencionar explícitamente que la banda de 700 MHz actúa como capa de cobertura/alcance (debido a su menor pérdida por propagación) y la de 1700/2100 MHz (AWS) como capa de capacidad.

.La verificación del diseño se llevó a cabo mediante simulaciones utilizando el software Radio Mobile y QGIS, integrando un Modelo Digital de Elevación (DEM) para considerar las variaciones topográficas del área estudiada.

Palabras claves: LTE, *Small Cells*, Cobertura, Radio Mobile y QGIS, RSRP, SINR.

ABSTRACT

The goal of this study is to develop and evaluate a proposal to improve the 4G mobile network in the Milagro canton, Guayas province, Ecuador, with the aim of increasing coverage levels, signal quality, and service capacity in urban and peri-urban areas.

The initial assessment revealed that, while 4G coverage exists in the central part of the canton, some areas have received signal strength (RSRP) levels close to the minimum operating limit, as well as low signal-to-interference ratios (SINR), which directly impact throughput and user experience. Existing base stations are located between 2.7 km and 3.75 km from the urban center, resulting in estimated path losses of 110 to 130 dB, particularly at 1700 MHz.

Following a technical and geographical study, a solution was proposed focusing on the tactical implementation of small cells. This solution incorporates the 700 MHz band to improve indoor coverage and penetration, along with the 1700/2100 MHz band to increase capacity in high-demand areas. Design verification was performed using simulations with Radio Mobile and QGIS software, integrating a Digital Elevation Model (DEM) to account for the topographic variations in the study area.

Keywords: LTE, *Small Cells*, Coverage, Mobile Radio and QGIS, RSRP, SINR.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 Introducción

Para garantizar redes móviles robustas, confiables y eficientes en un entorno donde la digitalización de procesos, el aumento de la movilidad y la demanda creciente de servicios de banda ancha móvil están transformando permanentemente el ecosistema de las telecomunicaciones, se ha convertido en un factor esencial una gestión efectiva del espectro radioeléctrico. La Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT, 2026), es una entidad pública dedicada a ofrecer servicios de conectividad a nivel nacional. La combinación de estas condiciones con la morfología diversa del territorio ha puesto de manifiesto que es necesario optimizar la infraestructura LTE de CNT para elevar los niveles de cobertura, disminuir las áreas donde se degrada la señal y asegurar que el servicio esté disponible en lugares cruciales.

En este escenario, las bandas de 700 MHz y 1700/2100 MHz se presentan como recursos estratégicos cuya administración apropiada es esencial para optimizar la cobertura, asegurar un aumento de señal y mantener el crecimiento constante del tráfico de datos. Tratar sobre su comportamiento, su verdadero alcance y su capacidad para optimizar es un paso crucial para robustecer la infraestructura de comunicaciones y garantizar una experiencia móvil.

1.2 Antecedentes

El crecimiento del tráfico de datos móviles en Ecuador ha seguido la tendencia mundial de incremento sostenido en el consumo de servicios digitales, particularmente en entornos urbanos. Según la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL, 2023), el acceso a internet móvil ha experimentado un aumento significativo en los últimos años, impulsado por el uso de plataformas de educación virtual, redes sociales, comercio electrónico y servicios gubernamentales en línea.

El cantón de Milagro exhibe una alta densidad de población en su área urbana, donde se concentran las actividades comerciales, educativas y administrativas. Esta significativa acumulación de personas genera una demanda considerablemente mayor en las redes móviles, especialmente durante los momentos de mayor afluencia. El crecimiento rápido en el número de usuarios puede aumentar la carga de tráfico por celda, lo que impacta negativamente en aspectos críticos del rendimiento, como la latencia, la velocidad efectiva de descarga y la estabilidad de las conexiones. Según un informe de (Cisco, 2022), el tráfico móvil ha experimentado un notable aumento debido al consumo de video en línea, que representa más del 60% del tráfico total y ejerce presión sobre la infraestructura de red en áreas urbanas densamente pobladas. A pesar de estas circunstancias, muchas redes LTE en ciudades intermedias fueron diseñadas originalmente con un enfoque macrocelular que prioriza el alcance geográfico sobre la capacidad, lo que puede provocar congestión dentro de los núcleos urbanos.

Este método fue consistente en las fases iniciales de implementación, cuando la meta principal era alcanzar cobertura poblacional.

En este marco, la administración eficaz del espectro radioeléctrico cobra una importancia estratégica. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

(OECD, 2021), señala que una gestión dinámica del espectro y la adopción de métodos de reutilización de frecuencias posibilitan optimizar la eficiencia espectral y reducir la saturación en entornos urbanos.

Esta arquitectura optimiza la eficiencia espectral en zonas urbanas congestionadas, ofreciendo una alternativa técnica y económicamente viable frente a la saturación de las macro celdas tradicionales.

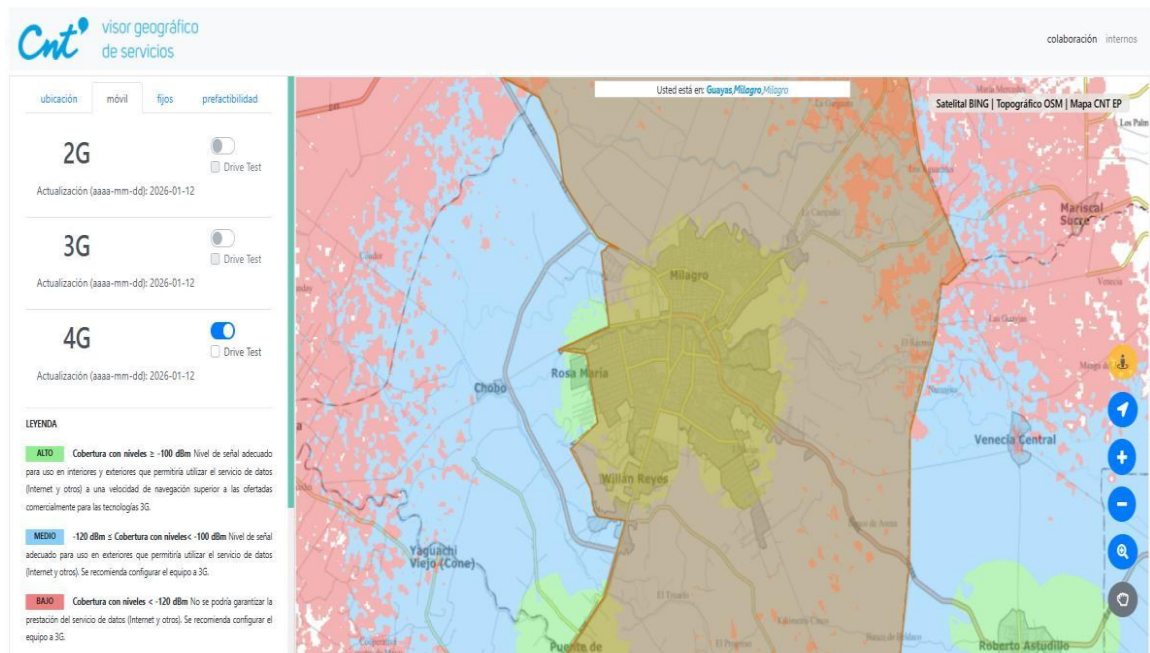
1.3 Definición de Problema

La cobertura móvil es un elemento esencial para asegurar la continuidad, disponibilidad y calidad del servicio en redes LTE, sobre todo frente al constante aumento del tráfico de datos en el cantón Milagro. Las frecuencias de 700 MHz (B28) y 1700/2100 MHz (AWS – B4) son recursos clave del espectro radioeléctrico, dado que facilitan un balance entre el alcance, la penetración en interiores y la capacidad de transmisión.

Según las recomendaciones técnicas existentes, los parámetros de RSRP, SINR y rendimiento constituyen los KPI de la calidad de la red LTE. En la práctica, los valores de cobertura aceptables son aquellos cuando el RSRP está por encima de -100 dBm, el SINR es mayor de 10 dB, y la tasa de transferencia proporciona una experiencia de datos móviles consistente. Pero en los distritos urbanos densos como en Milagro se observa que el RSRP cae por debajo de -105 dBm en la banda de 1700/2100 MHz, lo que puede atribuirse a una atenuación de propagación excesiva y mayores pérdidas de penetración en estructuras de concreto.

Desde la perspectiva regulatoria, el correcto uso del espectro y asegura la calidad del servicio son responsabilidades impuestas por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL, 2023), por lo que el incumplimiento recurrente de indicadores técnicos puede influir en la competitividad y el posicionamiento del operador CNT EP.

Figura 1. Cobertura 4G CNT en el cantón de Milagro



Nota. En el grafico visualizamos la cobertura geográfica. Tomado de (CNT, 2026).

1.4 Justificación

El constante aumento del tráfico de datos móviles en el cantón Milagro ha generado una demanda considerable sobre la infraestructura LTE actual, revelando limitaciones en cobertura uniforme, penetración en interiores y capacidad en áreas de alta densidad poblacional.

Desde la perspectiva técnica, la investigación se fundamenta en la necesidad de aumentar la eficiencia espectral (bits/s/Hz), optimizar la distribución de carga entre bandas y minimizar áreas de sombra radioeléctrica utilizando herramientas de simulación y modelado de propagación.

Desde una perspectiva social, la insuficiente cobertura contribuye directamente a agravar la brecha digital en el cantón, restringiendo el acceso equitativo a servicios como educación en línea, comercio digital, telemedicina, trámites gubernamentales y servicios financieros electrónicos. Mejorar tanto la calidad como la continuidad de la señal fomentará la inclusión digital y brindará mayores oportunidades y equidad a los habitantes de Milagro, promoviendo así un desarrollo tecnológico en la región.

En el contexto económico, la optimización técnica del espectro posibilita a la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT PE), potenciar el uso de la infraestructura actual, con la implementación de Small Cells.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño actual de la red móvil 4G LTE en el cantón Milagro y diseñar una propuesta técnica de optimización basada en la planificación y simulación de la red en las bandas 700 MHz y 1700/2100 MHz, orientada a mejorar la cobertura e indicadores de desempeño (KPIs) de radiofrecuencia.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Evaluar los indicadores técnicos de rendimiento de la red 4G (RSRP, SINR y throughput) para establecer el estado actual de cobertura y calidad del servicio en el cantón Milagro.
- Localizar áreas con escasa cobertura o elevada congestión y analizar la viabilidad técnica de introducir Small Cells como solución para la densificación de la red.
- Elaborar una propuesta técnica y financiera que incluya la integración estratégica de Small Cells para mejorar y extender la cobertura 4G en la zona de análisis.
- Verificar la propuesta a través de simulaciones en QGIS y Radio Mobile, analizando los resultados previos y posteriores a la instalación en relación a cobertura y rendimiento.

1.6 Hipótesis

Si se optimiza la utilización de las bandas de 700 MHz y 1700/2100 MHz mediante la densificación de nodos y la implementación de Small Cells en el cantón Milagro, entonces se mejorarán los niveles de cobertura y calidad del servicio 4G, incrementando el acceso a servicios móviles y contribuyendo al desarrollo socioeconómico local, así mejorarán los niveles de cobertura (RSRP) y la calidad de la señal (SINR), garantizando un throughput superior al umbral de diseño.

1.7 Metodología de la Investigación

Esta investigación utiliza un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en el análisis de datos técnicos medibles vinculados a la red móvil 4G LTE en el cantón Milagro, abarcando indicadores clave de rendimiento (KPI) como RSRP, SINR y throughput, además de datos sobre cobertura, densidad poblacional e infraestructura vigente. Este método posibilita fundamentar el diagnóstico técnico de la red a través de parámetros comprobables y comparables.

En lugar de ser clasificado solo como un estudio exploratorio o analítico-sintético, el trabajo se sitúa dentro de una metodología de diseño de ingeniería, con el objetivo de diagnosticar, modelar, simular y evaluar el rendimiento de la red LTE. En una fase inicial, se examinarán de manera individual los aspectos técnicos y geográficos que afectan la cobertura, como las pérdidas por propagación, la interferencia entre celdas, la capacidad espectral, la topografía y la densidad de usuarios.

El resumen de estos resultados se compilará y se desarrollará una propuesta de optimización técnica basada en criterios de planificación de radio. La metodología cubre cada una de las siguientes etapas técnicas: descripción del área de investigación, recopilación de los KPI existentes, modelado geográfico mediante el procesamiento de modelos digitales de elevación (DEM), cálculo del presupuesto de enlace para las frecuencias de 700 MHz y

1700/2100 MHz simulación de escenarios en software especializado y análisis comparativo entre la red actual y la propuesta optimizada.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

2.1 Red Móvil

La evolución de las redes móviles ha estado marcada por avances tecnológicos que han permitido incrementar progresivamente la capacidad, velocidad y eficiencia de los sistemas de comunicación inalámbrica. Las primeras generaciones de redes móviles, como 1G y 2G, estuvieron orientadas principalmente a la transmisión de voz, con capacidades limitadas para el envío de datos. Con la llegada de la tercera generación (3G), se incorporaron servicios de datos móviles, aunque con restricciones en términos de velocidad y latencia.

La introducción de la tecnología LTE (Long-Term Evolution), conocida como 4G, representó un cambio significativo al permitir altas tasas de transmisión de datos, mejor eficiencia espectral y una mejor experiencia para el usuario. Según (Dahlman, 2020), la evolución de las redes celulares ha permitido una utilización más eficiente del espectro radioeléctrico mediante técnicas avanzadas de modulación, acceso múltiple y planificación de red.

En ciudades como Milagro, la evolución hacia tecnologías más avanzadas implica el reto de optimizar las redes existentes, integrando nuevas bandas de frecuencia sin generar interferencias ni degradar la calidad del servicio. La coexistencia de múltiples tecnologías y bandas exige una planificación técnica rigurosa, orientada a maximizar el aprovechamiento del espectro disponible.

2.1.2 Evolución de las redes móviles

Según (Telecom, 2024) La evolución de las redes móviles ha estado determinada por la necesidad creciente de mejorar la capacidad, la eficiencia espectral, la velocidad de transmisión y la calidad del servicio (QoS). Cada generación tecnológica ha representado un avance significativo en arquitectura, técnicas de acceso múltiple y esquemas de modulación.

2.1.3 Primera generación - 1G:

Esta primera generación de telefonía móvil tuvo su aparición a finales de los años 70, el estándar 1G trajo la movilidad a través de señales analógicas moduladas en frecuencia. Según (Barreno, Carrión, & Tenecora, 2020), la transmisión se fundamentaba en transformar la voz en pulsos eléctricos variables, empleando la técnica de acceso FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia).

El sistema mostraba una débil eficiencia espectral y era muy susceptible a la interferencia electromagnética ruido, lo que aumentaba los gastos operativos al necesitar un mayor ancho de banda (30 kHz por canal) para una capacidad de usuario limitada.

Tabla 1 Características de Primera Generación de Redes Móviles

Categoría	Descripción
Año	1970 - 1980
Estándares	AMPS (Advanced Mobile Phone System)
Servicios	Sólo voz
Tecnología	Analógica
Velocidad	1 kbps a 2,4 kbps
Multiplexación	FDMA
Conmutación	Conmutación de circuitos
Core Network	PSTN
Frecuencia	800-900 MHz
Ancho de banda de RF	30 kHz

Nota: Características de la 1G. Fuente: Elaboración propia.

Esta banda tiene una capacidad de 832 canales dúplex de los cuales 21 se reservan para generar la llamada y el resto para la comunicación. Una de las principales desventajas de esta tecnología es que cualquier alteración en el aire insertaba ruido al sistema y ocupaba un gran espacio dentro del espectro lo que generaba un aumento en los costos.

2.1.4 Segunda Generación - 2G

La implementación de GSM indicó el paso a sistemas digitales, utilizando codificación binaria que mejoró notablemente la resistencia al ruido. De acuerdo con (Martinez, E., 2021), esta generación implementó la idea de conmutación de circuitos para llamadas y, más tarde, servicios de datos simples como SMS.

Innovaciones Principales: Se llevó a cabo el Handover para la continuidad de las comunicaciones entre celdas y el Roaming para la interoperabilidad a nivel internacional. En cuanto a eficiencia, la implementación de TDMA facilitó la multiplexión de varios usuarios en una sola portadora de 200 kHz

Tabla 2. *Características de Segunda Generación de Redes Móviles*

Categoría	Descripción
Año	1980 - 1990
Tecnología	Implementación de sistemas digitales en reemplazo de la telefonía móvil analógica.
Velocidad	Tasas de datos que oscilan entre 14 kbps y 64 kbps, apropiadas para voz digital y servicios esenciales de datos
Banda de frecuencia	Operación en rangos como 850–1900 MHz para GSM y 825–849 MHz en sistemas CDMA, dependiendo de la región.

Ancho de banda / canal	En GSM, cada canal de 200 kHz se distribuye en intervalos de tiempo para varios usuarios. En CDMA, el canal habitual es de alrededor de 1,23 MHz.
Multiplicación	TDMA y CDMA
Conmutación	Principalmente conmutación de circuitos, creando una conexión exclusiva durante la comunicación.
Estándares	GSM, IS-95 (CDMA), JDC (sistema digital japonés que emplea TDMA) e iDEN (tecnología utilizada por Nextel en Estados Unidos).

Nota: Características de la 2G. Fuente: Elaboración propia.

2.1.5. Tercera generación - 3G

La introducción del estándar UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles) marcó la transición hacia una arquitectura de banda ancha completamente estandarizada por el 3GPP. Según (Mishra, 2021), esta generación presentó la interfaz de radio WCDMA, facilitando la fusión de redes terrestres y satelitales para proporcionar servicios multimedia de alta calidad. A diferencia de las tecnologías anteriores, el 3G mejoró la capacidad de datos para permitir aplicaciones de Internet móvil con velocidades de transferencia de hasta 2 Mbps en condiciones de baja movilidad.

Tabla 3. *Características Técnicas de la Tecnología 3G*

Categoría	Descripción
Año	2000
Estándares	UMTS (WCDMA), que surge de la evolución de la infraestructura GSM y fue estandarizado por 3GPP.

	CDMA2000, desarrollo directo del sistema IS-95 de segunda generación, normalizado por 3GPP2
Velocidad según movilidad	Puede alcanzar hasta 2 Mbps en condiciones de baja movilidad (usuarios desplazándose a menos de 10 km/h).
Frecuencia	Aproximadamente 8 a 2,5 GHz
Ancho de banda	Utiliza canales con anchos que varían entre 5 MHz y 20 MHz, dependiendo del estándar y la configuración de red.
Interfaz de radio	WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access)

Nota: Características de la tecnología 3G. Fuente: Elaboración propia.

2.1.6 Cuarta generación – 4G

La cuarta generación de comunicaciones móviles, denominada LTE (Long-Term Evolution), introdujo una ruptura tecnológica al migrar hacia una arquitectura basada íntegramente en el protocolo de internet (All-IP). Según (Toskala, Harri Holma, 2020), esta evolución permite una gestión más eficiente del tráfico de datos al simplificar el núcleo de red y reducir la latencia. Asimismo, (Mishra, 2021) destaca que el éxito de la cobertura 4G en entornos urbanos radica en el uso de técnicas de multiplexación OFDMA y el sistema de antenas MIMO, los cuales maximizan la tasa de transferencia sin requerir una expansión desproporcionada del espectro radioeléctrico.

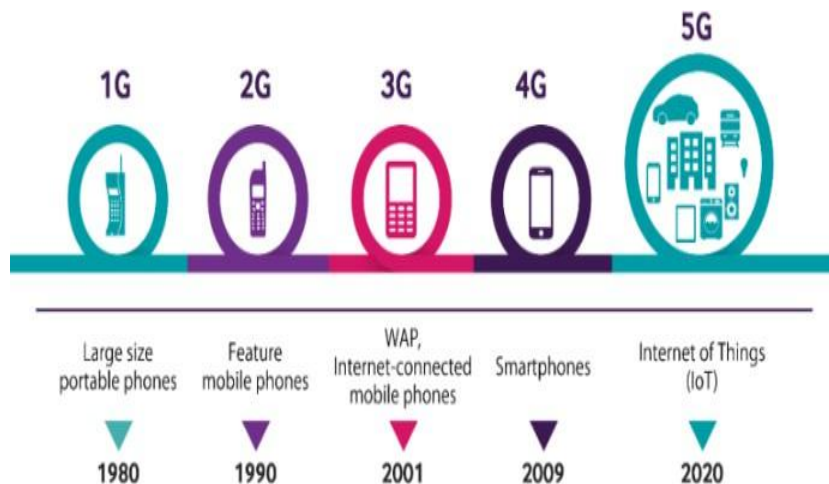
Tabla 4. *Características de la Tecnología 4G*

Categoría	Descripción
------------------	--------------------

Año	2008
Especificación	La UIT-R define los requisitos para los sistemas 4G.
Estándares	LTE-TDD y LTE-FDD (Long-Term Evolution Time-Division Duplex) <hr/> WiMAX móvil (802.16m, estandarizado por el IEEE)
Velocidad	100 Mbps en movimiento <hr/> 1 Gbps inmóvil
Tecnologías de Multiplexación / acceso	OFDMA en el enlace descendente. SC-FDMA en el enlace ascendente.
Esquemas de comunicación	MIMO (Multiple Input-Multiple Output)
Ancho de banda	5-20 MHz, opcionalmente hasta 40 MHz

Nota: Características de la tecnología 4G. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. La evolución de las tecnologías de telefonía móvil



Nota: El grafico representa la evolución de la telefonía móvil. Tomado de (Juan, 2020).

En contextos urbanos y periurbanos como el cantón Milagro, la evolución tecnológica implica desafíos asociados a la planificación eficiente del espectro, el control de interferencias y la optimización de cobertura en entornos con variaciones topográficas y densidad poblacional variable.

2.1.7 Cómo se realiza la Comunicación en una Red móvil

La comunicación en una red móvil sigue un proceso bien definido:

- **Conexión inicial:** Cuando enciendes tu teléfono móvil, éste se conecta automáticamente a la torre de telecomunicaciones más cercana. La torre autentica el dispositivo y lo conecta a la red del proveedor de servicios.
- **Establecimiento de una llamada o conexión de datos:** Cuando realizas una llamada o te conectas a internet, el dispositivo envía una solicitud a la torre de telecomunicaciones. Esta solicitud se dirige a través de la red troncal hacia el servidor o destino apropiado.
- **Transferencia de datos:** Durante una llamada o mientras navegas por internet, los datos se transfieren de manera continua entre tu dispositivo y la torre de telecomunicaciones. Este proceso ocurre en tiempo real, lo que te permite

mantener una conversación fluida o una sesión de navegación sin interrupciones.

- **Handover (transferencia de celdas):** Si te mueves mientras estás en una llamada o conectado a internet, la red móvil transfiere automáticamente la conexión a la siguiente celda sin que lo notes. Este proceso se llama "handover" y es crucial para mantener la calidad de la comunicación.

2.1.8 Tipos de Redes móviles

Además de las generaciones de redes (1G, 2G, 3G, 4G, 5G), existen diferentes tipos de redes móviles que funcionan en distintas frecuencias y tecnologías:

- **GSM (Global System for Mobile Communications):** Es la tecnología más común para redes móviles, utilizada en todo el mundo. GSM utiliza una combinación de tecnología de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y división de frecuencia (FDMA) para maximizar la eficiencia del espectro.
- **CDMA (Code División Múltiple Access):** Es otra tecnología utilizada en redes móviles, principalmente en América del Norte y Asia. CDMA permite que múltiples usuarios compartan el mismo espectro de frecuencia al asignar un código único a cada usuario.
- **LTE (Long-Term Evolución):** LTE es un estándar de 4G que ofrece velocidades de datos mucho más rápidas que las tecnologías anteriores. Utiliza técnicas avanzadas como OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) para mejorar la eficiencia del espectro y la velocidad de datos.

LTE utiliza:

- OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) en la dirección descendente.
- SC-FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única) en el canal de subida.
- Técnicas MIMO (Múltiples Entradas Múltiples Salidas) para aumentar capacidad y fiabilidad.

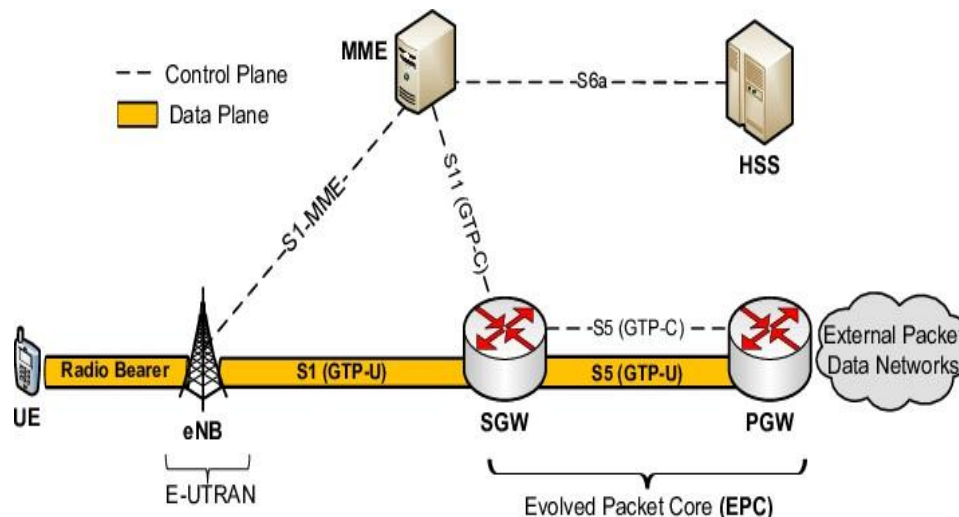
Asimismo, emplea reutilización de frecuencia 1, lo que significa que todas las celdas funcionan en el mismo bloque espectral, mejorando la eficiencia aunque también incrementando el riesgo de interferencia entre celdas.

2.1.9 Arquitectura de Red 4G LTE

La arquitectura LTE se estructura principalmente en dos bloques esenciales:

- **eNodeB (Evolved Node B):** Estación base responsable de la gestión del acceso radio, asignación dinámica de recursos, control de potencia y manejo de interferencias.
- **EPC (Evolved Packet Core):** Infraestructura de red responsable del enrutamiento IP, autenticación, movilidad y administración de sesiones de datos.

Figura 3. Arquitectura EPC de LTE (plano de control y plano de datos).



Nota: La arquitectura LTE se encuentra estructurada en dos planos diferenciados: el plano de control, gestionado principalmente por el MME, y el plano de usuario, encargado del transporte de datos a través de los nodos SGW y PGW. Tomado de: (Muhammad A. Amin, 2020)

LTE elimina la conmutación de circuitos y funciona bajo un sistema totalmente basado en paquetes, lo que disminuye la latencia y optimiza la eficiencia en la transmisión de datos. (Wang, H., & Li, P., 2023)

El enlace ascendente utiliza SC-FDMA, mientras que el enlace descendente utiliza OFDMA, maximizando el ahorro energético del dispositivo móvil.

Igualmente, la inclusión de MIMO (Múltiples Entradas Múltiples Salidas) favorece el aumento de la capacidad a través de diversidad espacial y multiplexación espacial, elevando la tasa de transmisión sin necesitar un mayor ancho de banda

2.1.10 Parámetros de Rendimiento en LTE

La evaluación del rendimiento de una red LTE se realiza a través de indicadores clave de rendimiento (KPI), que facilitan la medición de cobertura, calidad y capacidad.

2.1.11 RSRP (Potencia del Señal de Referencia Recibida)

El RSRP evalúa la potencia media recibida de las señales de referencia LTE. Es una señal clave de cobertura.

Valores comunes (3GPP, 2023):

- Óptimo: -80 dBm a -90 dBm
- Bueno: -90 dBm a -100 dBm
- Normal: -100 dBm to -110 dBm
- Deficiente: < -110 dBm

2.1.12 SINR

El SINR mide la calidad del enlace de radio al comparar la potencia de la señal deseada con la interferencia y el ruido.

Un SINR alto posibilita la utilización de modulaciones de mayor orden como 64QAM o 256 QAM, aumentando el throughput. En cambio, niveles bajos hacen que el sistema tenga que usar QPSK, disminuyendo la velocidad de transmisión.

2.1.13 Throughput

El throughput refleja la velocidad efectiva de transmisión que experimenta el usuario final. Depende de:

- Calidad de la señal (RSRP)
- Grado de interferencia (SINR)
- Ancho de banda otorgado
- Cantidad de usuarios en activo

Hay una conexión directa entre estos parámetros, puesto que una disminución en RSRP impacta el SINR y restringe el esquema de modulación empleado.

2.1.14 Modelo de Propagación en Espacio Libre

El modelo de propagación en espacio libre constituye el fundamento teórico para predecir la intensidad de la señal recibida en entornos donde existe una línea de vista (LoS - Line of Sight) despejada entre el transmisor y el receptor, sin presencia de obstáculos que provoquen difracción o reflexión significativa.

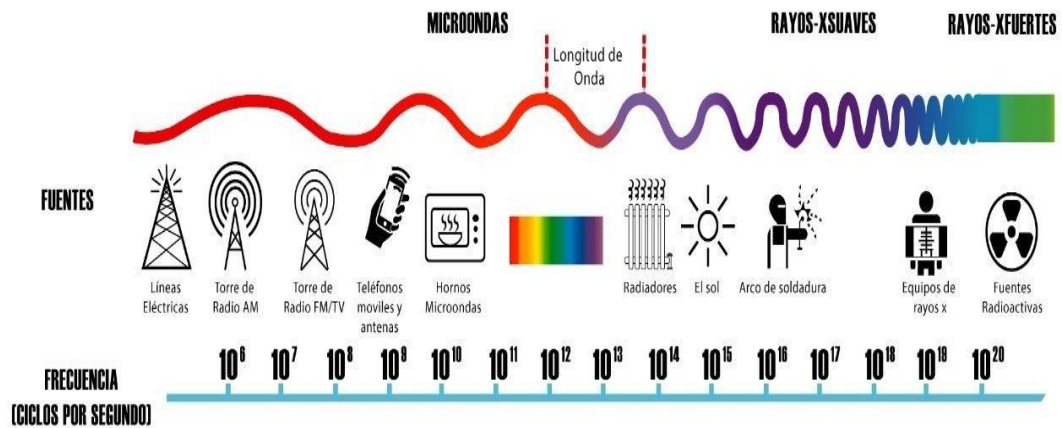
Según (Mishra, 2021), este modelo establece que la atenuación de la onda electromagnética es directamente proporcional al cuadrado de la distancia y al cuadrado de la frecuencia de operación. En el diseño de redes para el cantón Milagro, este modelo es aplicable principalmente para los enlaces de retroceso (*backhaul*) punto a punto que conectarán las celdas pequeñas con la red macrocelular.

2.2 Espectro Radioeléctrico

La gestión eficaz del espectro radioeléctrico, un recurso natural escaso, es esencial para el avance de las telecomunicaciones móviles. La cobertura, la capacidad y la calidad del servicio brindado a los clientes se aseguran mediante la correcta asignación de bandas de frecuencia. Según la (UIT, 2020), una administración deficiente del espectro puede dar lugar a interferencias, escasa calidad del servicio y exclusión digital.

El objetivo de la planificación del espectro radioeléctrico es balancear la eficacia en el uso de frecuencias con la cobertura a nivel nacional. Para ciudades intermedias con una dinámica urbana similar a Milagro, optimizar el espectro radioeléctrico no se trata solo de la asignación de frecuencias, sino también de un proceso de planificación estratégica adecuado que equilibre la cobertura en áreas de expansión con la capacidad en el núcleo consolidado. (Mishra, 2021) . Afirmó que para asegurar la penetración en interiores y controlar la densidad del tráfico, se deben incorporar bandas bajas (por ejemplo, la banda de 700 MHz); esto es posible mediante métodos avanzados de reutilización de frecuencias y técnicas de coordinación de interferencias.

Figura 4. Composición des espectro electromagnético



Nota: Se observa el cómo funciona el espectro radioeléctrico. Tomado de (Gov.Co, 2022)

2.2.1 Estación base o Radiobase

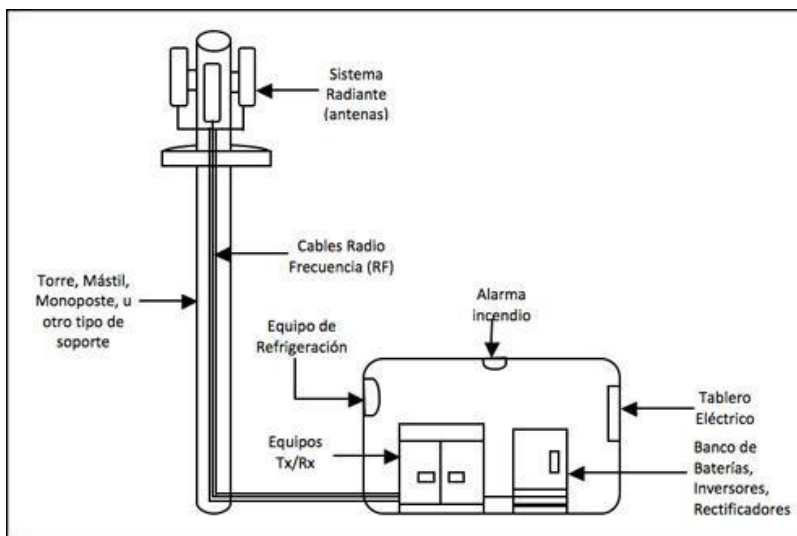
Es una estación de transmisión y recepción que se encuentra en un sitio estable, la cual está formada por una o más antenas de transmisión/recepción, una antena de microondas y un conjunto de circuitos electrónicos. Se utiliza para gestionar el tráfico de llamadas. Actúa como un conector entre todos los usuarios móviles de la misma celda y conecta las llamadas realizadas desde dispositivos al centro de conmutación. Las estaciones de radio son fundamentales para el establecimiento de la red móvil en el cantón Milagro, teniendo en cuenta el territorio, el crecimiento urbano y las condiciones socioeconómicas. Dichas infraestructuras transmiten y reciben señales de radiofrecuencia entre los dispositivos móviles de los usuarios y la red del operador, lo que garantiza servicios de comunicación accesibles en las áreas rurales, periurbanas y urbanas del cantón. Esto se debe a que se requiere más capacidad para manejar el tráfico de datos móviles.

La mezcla de las dos bandas ayuda a mejorar la calidad del servicio y a disminuir los problemas de congestión en la red. (Velásquez, 2021)

2.2.2 Componentes de una Radiobase

1. Sistema Radiante Antena o antenas: emisoras y receptoras de las señales de radio.
2. Torre, Mástil, Monoposte u otro tipo de soporte.
3. Equipo de comunicación o radio base (Rx/Tx). Enlace con la central telefónica.
4. Planta eléctrica o baterías que sirven para garantizar el funcionamiento del sistema.
5. Sistema de refrigeración que permiten el correcto funcionamiento de la Radiobase
6. Alarma de incendio

Figura 5. Componentes de una Radiobase



Nota: Se observa cuáles son los componentes de una Radiobase. Tomado de (Velásquez, 2021)

2.3. Modelos de Propagación de Onda

Los modelos de expansión de onda son importantes cuando se están configurando redes inalámbricas, porque te ayudan a averiguar cómo se mueven las ondas de radio y qué tipo de

fuerza de señal conseguirás basándote en lo lejos que están los dispositivos de envío y recepción. Y tú puedes usar estos modelos para averiguar el área cubierta, comprobar la calidad del enlace y evaluar el rendimiento de la red en varios entornos de expansión.

Estos modelos nacen en respuesta a lo que se necesita para representar estrechamente el efecto que las características geográficas del sitio tienen sobre la expansión de la señal, como relieve, existencia de edificios, vegetación y otros obstáculos que causan eventos como la reducción, la reflexión. El terreno real puede lanzar bolas curvas con sus grandes cambios y diferencias, y ahí es donde los modelos de propagación son útiles para averiguar cómo las señales viajan desde la estación base a nuestros aparatos. A continuación, se presentan modelos de propagación existentes.

2.3.1 Okumura Hata

Uno de los modelos empíricos más frecuentemente aplicados para el diseño y la planificación de sistemas de comunicación móvil en tierra es el modelo de propagación Hata. Con el fin de facilitar su implementación a través de expresiones matemáticas que hagan posible calcular con eficiencia la pérdida de trayectoria en diversos tipos de ambientes, se desarrolló este modelo a partir de las curvas de propagación sugeridas por Okumura.

El modelo de Hata puede utilizarse para frecuencias que oscilan entre 150 MHz y 1500 MHz, distancias de hasta 20 km y hasta 1 km, alturas de antena en la estación base que van desde los 30 m a los 200 m, así como alturas del receptor móvil que varían entre los 1 m y los 10 m. El modelo es apropiado para analizar redes celulares debido a estas características. (Singh, Y, 2022).

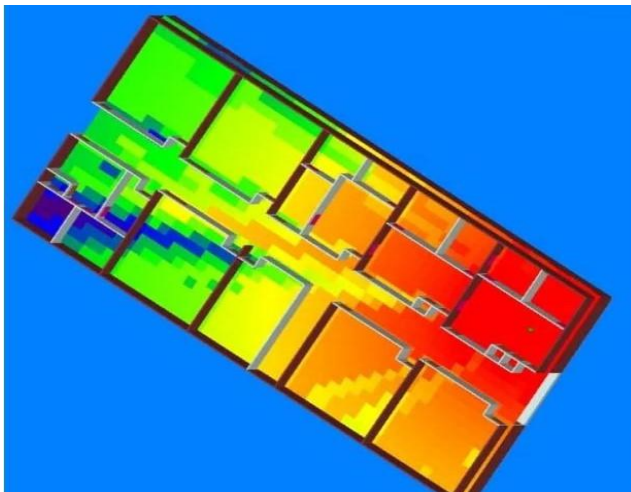
La sencillez y la fiabilidad son dos de los beneficios más importantes del modelo de Hata, pues proporciona resultados aceptables con una complejidad computacional baja. No obstante, su exactitud podría verse restringida en situaciones donde haya una gran irregularidad del terreno o en frecuencias más elevadas que las de su rango de validez.

El modelo de Hata es particularmente eficaz para el análisis de cobertura en bandas próximas a 700 MHz dentro del entorno de redes móviles 4G, ya que su rango de frecuencia posibilita una representación precisa del comportamiento de la señal. Esto resulta importante para áreas suburbanas y rurales, como las que se encuentran en el cantón Milagro.

2.3.2 Recuento de Paredes

El modelo de recuento de paredes es el método en tiempo real de Wireless InSite para el cálculo en interiores. Se construyen rayos directos entre el transmisor y el receptor, y se cuenta cada pared intersectada en la geometría interior. Cada intersección añade 3 dB adicionales de pérdida a la pérdida de trayectoria en el espacio libre. (Actualmente sólo se puede acceder a este modelo a través de la API). (Remcom, 2024)

Figura 6. *Modelo de Propagación por Recuento de Paredes*



Nota: Se observa cómo funciona la propagación de recuento de paredes. Tomado de (Remcom, 2024)

2.4 Software de Simulación

2.4.1 Radio Mobile

Radio Mobile se caracteriza como una herramienta de simulación estocástica enfocada en el estudio de propagación electromagnética, cuyo núcleo de cálculo se basa en el modelo Longley-Rice o Modelo de Terreno Irregular (ITM). (IELECTEL, 2024), la solidez de este

programa se basa en su habilidad para anticipar la degradación de la señal teniendo en cuenta variables complejas como la refractividad del aire, la conductividad del suelo y, principalmente, las pérdidas por difracción ocasionadas por la rugosidad del terreno orográfico. Este recurso también facilita el modelado de enlaces de microondas punto a punto y la creación de arquitecturas de red en el cantón Milagro, al mismo tiempo que optimiza la generación de mapas de cobertura que integran información cartográfica digital. Esta funcionalidad es esencial para verificar el cumplimiento de los niveles de potencia recibida (RSRP) en escenarios con obstáculos (IELECTEL, 2024). Radio Mobile se ha consolidado como una herramienta ampliamente utilizada en el sector de las telecomunicaciones, permitiendo realizar análisis y simulaciones sobre la propagación de ondas de radio en diversos entornos geográficos. El objetivo principal de este programa es mejorar las etapas de diseño, optimización y planificación de redes de radio. Las aplicaciones más utilizadas son las siguientes:

Planificación de Cobertura: Permite verificar la cobertura de la señal de radio en zonas determinadas considerando factores como potencia de transmisión, geografía del terreno y altura de las antenas.

Análisis de Interferencias: Sirve como identificador de posibles interferencias entre señales lo que determina la calidad de la comunicación.

Optimización de Redes: Permite simular diversos escenarios de prueba para poder optimizar la red y planificar la toma de decisiones como configuración de ciertos parámetros.

Estudio de Enlaces: También permite evaluar el rendimiento de sistemas específicos para asegurar un correcto diseño del sistema de comunicación (IELECTEL, 2024).

2.4.2 QGIS

QGIS es una plataforma SIG de código abierto que le ayuda a ver, ajustar y estudiar datos espaciales. En el mundo del teléfono y cosas de Internet, es súper importante para la

planificación de redes inalámbricas porque le permite mezclar cómo las señales se propagan con mapas reales. (QGIS, 2023)

- **Capacidad de análisis:** El software le permite manejar capas de raster y vectores para comprobar qué tan bien una base de radio cubre el terreno
- **Extensibilidad:** Gracias a la adición herramientas como herramientas RF y QGIS se convierten en aparatos de ingeniería que pueden averiguar RSRP fortalezas de señal.
- **Gestión de datos de campo:** Permite introducir datos de elevación (DEM), modelos súper importantes como Okumura-Hata para hacer que las cosas parezcan reales.

CAPITULO III: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED MOVIL 4G

Expandir la cobertura de la red móvil en áreas rurales es un desafío tanto tecnológico como social, especialmente en regiones con conexiones difíciles, como el cantón de Milagro. En el primer capítulo se analizan los principales problemas de la red 4G actual: señal débil, cobertura limitada y fallos frecuentes. El segundo capítulo examina los modelos de propagación, la tecnología celular actual y las técnicas de simulación más efectivas para enfrentar el desafío.

En este capítulo, se presenta una solución concreta para optimizar la conectividad local. El concepto combina fundamentos de ingeniería de telecomunicaciones, estudio geográfico y mejora de recursos.

3.1. Diagnóstico de la Cobertura Actual de la red móvil 4G en el cantón de Milagro

Con el fin de establecer la situación actual de la cobertura de la red móvil 4G en el cantón de Milagro, se realizó un diagnóstico a partir de información extraída de las páginas web oficiales de las principales operadoras de telefonía móvil que operan en el país, las cuales publican periódicamente mapas y reportes actualizados de la situación de cobertura.

De hecho, a partir de esta información se puede establecer cuáles son las zonas de mayor y menor disponibilidad respecto del servicio 4G, así como también establecer la modalidad a partir de la cual es posible evaluar el rendimiento de la señal tanto en áreas urbanas como en sectores periurbanos y rurales del cantón.

El diagnóstico se realizó a partir del análisis de mapas oficiales de cobertura publicados por las principales operadoras móviles del país (CNT, Claro y Movistar), así como mediante herramientas geoespaciales como Google Earth para determinar la ubicación aproximada de estaciones base.

Un mapa de cobertura resulta útil para localizar zonas con buena disponibilidad de servicio y áreas con señal débil, especialmente en regiones periurbanas. El análisis ha

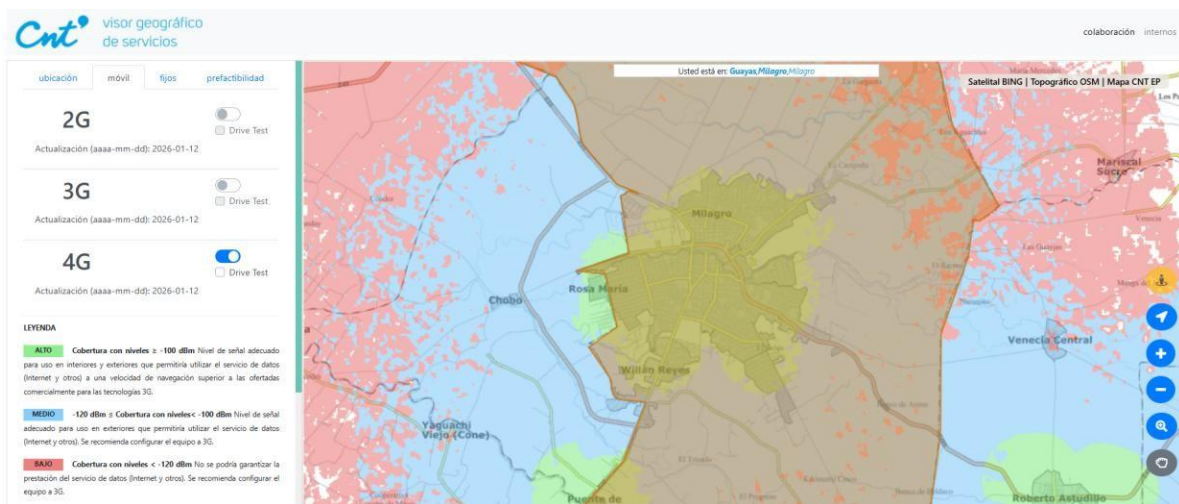
evidenciado que los nodos 4G situados a una distancia de entre 3.2 km y 3.75 km del centro urbano cumplen con los estándares de diseño requeridos para asegurar altas tasas de transferencia en esa área, lo que indica que las estrategias de densificación son cruciales para reducir el impacto de la distancia.

Para estas distancias, la pérdida de trayectoria estimada se encuentra entre:

- 110 – 120 dB en 700 MHz
- 120 – 130 dB en 1700 MHz

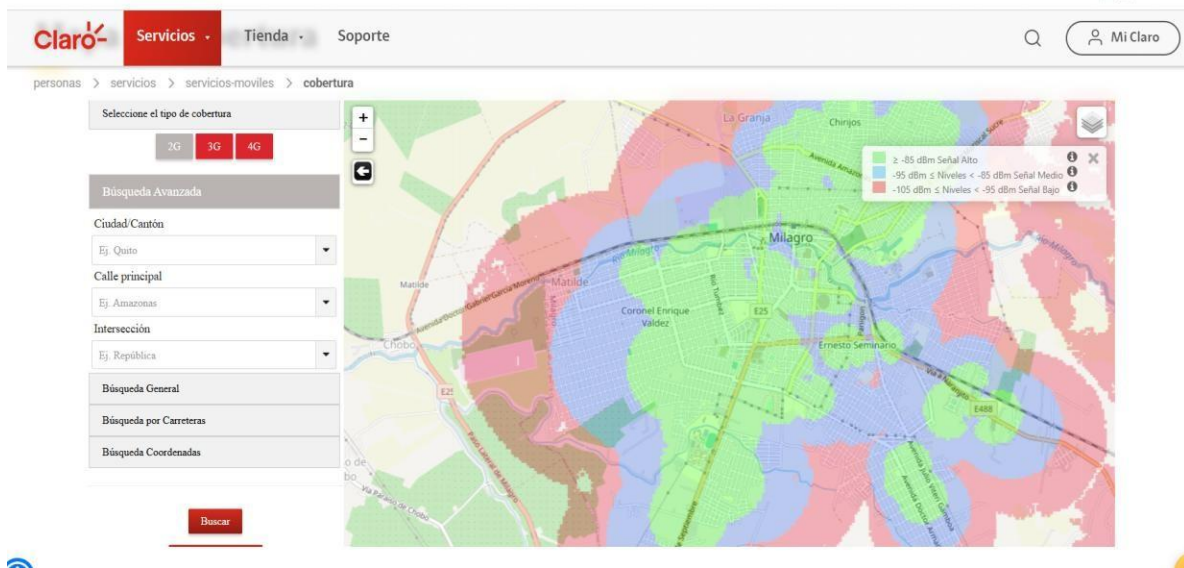
Estos valores se aproximan al límite operativo de cobertura LTE, especialmente en entornos urbanos con obstáculos estructurales.

Figura 7. Cobertura 4G CNT en el cantón de Milagro



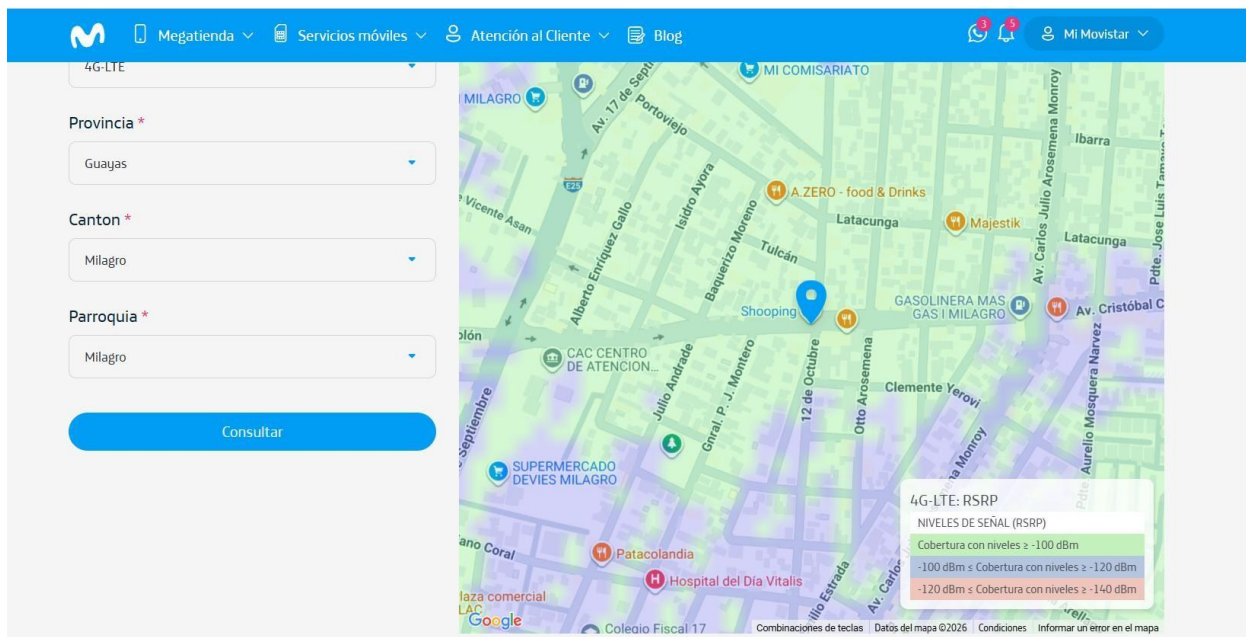
Nota: En el grafico visualizamos la cobertura geográfica. Tomado de (CNT, 2026).

Figura 8. Cobertura 4G Claro en el cantón de Milagro



Nota: En el grafico visualizamos la cobertura geográfica. Tomado de (CLARO, 2026)

Figura 9. Cobertura 4G Movistar en el cantón de Milagro



Nota: En el grafico visualizamos la cobertura geográfica. Tomado de (Movistar, 2026)

De los análisis de estos datos se desprende que, si bien se puede hablar de una cobertura importante de la red móvil 4G en la zona urbana del cantón de Milagro, también surgen limitaciones en zonas concretas en donde la red puede ser de baja calidad e incluso inestable.

Este diagnóstico es determinante a la hora de poder conocer cuál es el estado de la red móvil 4G en el cantón de Milagro y de poder identificar las brechas a nivel de conectividad, y es un elemento que permite superar los límites a partir de los cuales se deben establecer criterios técnicos que fundamenten la propuesta de optimización del uso de la tecnología móvil en bandas de frecuencias específicas.

Mediante Google Earth se pudo determinar a qué distancia aproximada se encuentran los nodos con tecnología 4G en el cantón de Milagro. La imagen muestra la situación actual de la cobertura 4G en el cantón Milagro a partir del centro del cantón y de la localización de los nodos de transmisión de las principales operadoras móviles. A partir de esta imagen, se puede comprobar que los nodos se sitúan a distancias grandes del núcleo urbano, lo que hace ver que gran parte de la cobertura es abastecida por estaciones base fuera del núcleo del cantón. Este hecho puede acarrear problemas de calidad de la señal, tales como disminución de la velocidad de datos, aumento de la latencia y sectores con cobertura irregular. El diagnóstico a partir de la imagen permite inferir la necesidad de una mejor distribución de la infraestructura de red para conseguir una mejor y más uniforme cobertura.

Figura 10. Situación actual de nodos cercanos del cantón Milagro.



Nota: Situación actual de nodos cercanos del cantón Milagro. Fuente: Elaboración propia.

Conforme a la distancia entre el centro del cantón Milagro y los nodos de transmisión 4G, la pérdida de trayectoria estimada es de 110 a 120 dB para la banda de 700 MHz y de 120 a 130 dB para la banda de 1700 MHz, lo que nos indica que esta cobertura es funcional aunque podría verse afectada en cuanto a calidad del servicio, sobre todo en aquellos ámbitos con densidad urbana o con obstáculos físicos. La magnitud de la pérdida indica que hay necesidad de ubicar de manera diferente y de densificar nodos para mejorar la cobertura y la capacidad de la red móvil.

3.1.1. Análisis de la Situación Actual de la Red en el cantón de Milagro

Entre los elementos clave reconocidos en la evaluación de la situación actual de la red se destacan los siguientes:

- **Cobertura definida para ciertos sectores:** Los nodos más cercanos a 4G de las operadoras CNT, Claro y Movistar se encuentran a distancias de aprox. entre 2.7 km y 3.75 km en relación con el centro urbano del cantón. Por consiguiente, las distancias relacionadas se sitúan en el límite de las distancias operativas de la tecnología 4G LTE y generan variaciones de señal en zonas de alta densidad, en las viviendas y en obstáculos urbanos.
- **Variabilidad en la calidad del servicio:** En el análisis de la cobertura, se pueden evidenciar diferencias en los niveles de estabilidad de los servicios de voz y de datos, especialmente en los sectores periféricos del cantón donde esta situación se relaciona con la dependencias de nodos ubicados fuera del núcleo urbano que provocan una mayor probabilidad de eventos como pérdidas transitorias de conexión, caída en la velocidad de datos y latencias elevadas.

- **Niveles de señal cercanos al umbral de operatividad:** Las estimaciones teóricas del nivel de señal recibida permiten llegar a la conclusión de que una parte importante de la parte urbana exhibe valores cercanos al umbral de mínima para garantizar que se presenten servicios 4G estables, especialmente en la banda de 1700 MHz lo que puede afectar la experiencia del usuario, fundamentalmente durante los esfuerzos de alta demanda.

3.2 Detección de Factores de Tipo Técnico o Geográfico que Influyen en la Cobertura

A pesar de que el cantón Milagro no tenga relieve montañoso pronunciado, sí puede tener factores geográficos y urbanos a influir que inciden en la atenuación de la señal, y que hacer estos parámetros de la cobertura en el cantón cambie. El cantón Milagro presenta concurrencias de Tipo Técnico y Geográfico que de forma paralela van a ayudar a generar una inclinación de la cobertura de la red móvil 4G. A continuación se encuentran los detalles de los factores que favorecen conjuntamente la propagación de dicha señal.

3.2.1. Factores Geográficos

El cantón conocido como Milagro califica porque es un catálogo de relieve principalmente plano, lo que en teoría podría ser ventajoso en la propagación de las señales de radio-frecuencia. No obstante, la construcción de infraestructura urbana densa, el número de varios niveles de edificaciones, las áreas industriales y aquellas con vegetación densa hacen que la señal esté sometida a ciertos fenómenos como los de reflexión, difracción y absorción. (Singh, 2022)

En ciertos sectores del cantón Milagro aparecen zonas de sombra radioeléctrica, más en concreto, en zonas distantes del centro o en áreas de gran cantidad de construcciones. La ausencia de visibilidad directa entre los nodos de transmisión y puntos poblacionales hace aumentar la pérdida de trayecto y contribuye a un menor grado de continuidad en la cobertura.

Y a su vez, el crecimiento urbano incontrolado ha dejado a muchas zonas residenciales fuera del rango de cobertura, punto que hace visible la escasa planificación y densificación de la red.

3.2.2. Factores Técnicos

Desde la perspectiva tecnológica, las estaciones base que cubren al cantón Milagro son en su mayoría estaciones que trabajan en las bandas de 700 y 1700 MHz, las que tienen distintos comportamientos de propagación. Mientras que la banda de 700 MHz tiene mejor penetración en interiores y mejor cobertura, la de 1700 MHz otorga mayor capacidad pero es más sensible a la atenuación por obstáculos.

La tecnología 4G LTE utilizada por las operadoras móviles ofrece altas velocidades de transmisión de datos, en cambio, su explotación depende en gran medida de la distancia al nodo, de la potencia radiada efectiva y de la carga de usuarios conectados, por tanto existen sectores donde la densidad de usuarios puede hacer que se presenten fenómenos de congestión que afectan a la satisfacción del servicio.

Por otra parte, el número escaso de nodos dentro del área urbana del cantón hace que para la red sea muy dependiente de estaciones base exteriores, lo cual disminuye la eficiencia del sistema y limita su respuesta al crecimiento de la demanda de servicios móviles.

3.2.3. Efecto de la Infraestructura y las Condiciones del Entorno

Si bien hay lugares donde sí existe la posibilidad de tener acceso suficiente a energía eléctrica y vías de comunicaciones, existen otros lugares donde la disponibilidad de espacios necesarios para colocar estaciones base son escasas.

Las condiciones climáticas como lluvias fuertes y humedad alta, también afectan el desempeño de los equipos de telecomunicaciones, provocando fallas en los sistemas eléctricos, enlaces de transmisión y antenas. Estas condiciones ambientales ayudan a la degradación progresiva de las infraestructuras y desmejoran la estabilidad del servicio.

3.3 Evaluación de las Tecnologías y las Soluciones Presentes

La optimización de la cobertura de la red 4G en el cantón Milagro es un reto técnico que guarda relación con el crecimiento urbano, este último en plena competencia con el aumento de la demanda de servicios de datos y con las limitaciones que impone la infraestructura actual. En este tipo de situaciones, la evaluación de las distintas soluciones tecnológicas que permitan mejorar la calidad, la capacidad y la continuidad del servicio es clave. Entre las principales alternativas destacan la densificación de nodos, la utilización de Small Cells, la maximización de las capacidades con la banda de 700 MHz y la reconfiguración de los parámetros de la red en la búsqueda de una mayor homogeneidad y eficiencia de toda la cobertura del cantón Milagro.

A continuación, se muestran las principales tecnologías y soluciones disponibles que se pueden utilizar para mejorar la cobertura en Milagro.

3.3.1 Implementación de Small Cells

Estas celdas se distinguen por dar cobertura a zonas geográficas pequeñas y trabajar con niveles de potencia mucho más bajos que las macro celdas. Esto permite que el transmisor esté más cerca del usuario final, lo que reduce las pérdidas por propagación y hace que el sistema sea más eficiente en términos de consumo energético. (GSMA, 2022)

La puesta en marcha de Small Cells podría ser especialmente ventajosa en el cantón Milagro, dado que su área tiene fluctuaciones en la densidad urbana entre áreas residenciales y lugares con una alta concentración de personas (como universidades, centros comerciales, espacios públicos e industriales). Por un lado, posibilita que se mejore la cobertura en microzonas críticas e interiores a las que no logran llegar las macro celdas tradicionales con la potencia adecuada, lo cual disminuye situaciones comunes de señal débil o zonas de sombra radioeléctrica. En sectores donde la infraestructura de backhaul puede ser cara o escasa, por otra parte, es especialmente relevante tener una infraestructura de backhaul sólida. Se debe

afrontar un desafío como este con soluciones como el enlace inalámbrico dedicado o la fibra óptica.

Tabla 5. *Ventajas y Desventajas de implementar Small Cells*

Ventajas	Desventajas
Disminuyen la latencia debido a la proximidad entre la estación base y el usuario final, favoreciendo aplicaciones en tiempo real y servicios de alta demanda.	El control de múltiples puntos de acceso incrementa, la necesidad de sistemas avanzados de gestión y control de la red.
Incrementan la capacidad del sistema al distribuir la carga de tráfico entre múltiples celdas, reduciendo la congestión y mejorando la calidad del servicio.	

Nota: Ventajas y Desventajas de Small Cell. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Repetidores de Señal (Relay Stations)

Un repetidor de señal es un dispositivo electrónico que se utiliza en telecomunicaciones para recibir una señal que ha perdido fuerza, amplificarla y volver a enviarla con más potencia. Esto ayuda a extender su alcance y a mantener la calidad de la señal, incluso en trayectos más largos o al atravesar obstáculos físicos. (Chen, 2024)

En cuanto a su funcionamiento, el repetidor capta la señal de entrada, la cual se ha debilitado por la distancia o interferencias

Además, a diferencia de un simple amplificador, que solo incrementa la potencia de la señal (incluyendo el ruido), el repetidor puede limpiar y regenerar la señal, devolviéndola a su estado original antes de retransmitirla. Esto, a su vez, mejora la fiabilidad y precisión en la comunicación.

Tabla 6. *Ventajas y Desventajas de Implementar repetidores de señal*

Ventajas	Desventajas
Tienen costos de implementación relativamente bajos en comparación con la instalación de nuevas estaciones base, ya que no requieren una conexión directa al núcleo de la red.	Sin embargo, si no se instalan o configuran correctamente, pueden interferir con el rendimiento de la red macrocelular.
Son compatibles con distintas tecnologías móviles (2G, 3G, 4G LTE e incluso 5G), lo que incrementa su flexibilidad dentro de redes ya existentes.	No aumentan la capacidad de la red, ya que solo amplifican la señal disponible, lo que en entornos de alta densidad de usuarios puede causar congestión.

Nota: Ventajas y Desventajas de repetidores de señal. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Extensión de Cobertura con Redes Satelitales

Ampliar la cobertura con redes satelitales es una solución técnica y estratégica para mejorar el acceso a los servicios de telecomunicaciones en Milagro, especialmente en las zonas rurales, agrícolas y áreas periféricas donde la infraestructura terrestre es escasa o difícil de expandir, pero hay algunos obstáculos con la tecnología satelital, como el precio del equipo, la gestión de las ondas de radio, condiciones climáticas adversas que afectan la propagación, las ventajas de alcance mundial y resistencia contra problemas terrestres hacen que las redes de satélites sean super importantes para lugares como el milagro rural, donde conseguir en línea es clave para el crecimiento, aprendizaje y dinero de la comunidad (Globalstar, 2025).

Tabla 7. *Ventajas y Desventajas de Implementar la extensión de redes satélites.*

Ventajas	Desventajas
Funcional en áreas donde no hay infraestructura de telecomunicaciones.	Latencia superior a la de las redes terrestres

Compatible con tecnologías 3G, 4G

Alto costo de instalación.

y 5G.

Nota: Ventajas y Desventajas de Implementar la extensión de redes satélites. Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Implementación de Redes Mesh

Implementar una red de malla es como darle a nuestras redes móviles 4G y 5G una superpotencia para llegar más lejos y mantenerse mejor conectados, especialmente en lugares como el campo o lugares difíciles de llegar donde la configuración de cosas de red regular no es fácil o solo lo hace este tipo de diseño de edificios utiliza una configuración de red donde cada punto del sistema hace su propio trabajo de enviar, obtener y transmitir datos, que permite el flujo de información a través de diferentes rutas según sea necesario.

Las redes de malla utilizan protocolos de enrutamiento auto-organizados que se ajustan a los cambios de red sobre la marcha. Esto significa que la red puede crecer fácilmente añadiendo nuevos nodos sin necesitar grandes cambios en su configuración. Pero como agregamos más nodos, podríamos encontrar problemas con retrasos, gestionando el flujo de datos, y señal de choques, en los que tenemos que pensar cuando estamos planeando y organizando las cosas (Gangi, 2020)

Tabla 8. *Ventajas y Desventajas de Implementar redes Mesh.*

Ventajas	Desventajas
Funciona de manera que la información se envía por la ruta más rápida	Se necesita un diseño estratégico de los nodos para prevenir la saturación.
Son capaces de auto configurarse, se calibran automáticamente y se conectan a la red sin ninguna configuración.	Complejidad en la implementación y gestión de la red.

Utiliza muy poca energía. Los
sensores también son muy baratos y duran
muchos años

Nota: Ventajas y Desventajas de implementar redes Mesh. Fuente: Elaboración propia.

3.4 Selección de la Solución Técnica para la Optimización de la Cobertura 4G en el Cantón Milagro.

Después de examinar la situación vigente sobre la cobertura 4G en Milagro y sopesar las opciones tecnológicas para optimizarla, es crucial escoger la solución técnica idónea. Esta opción debe mejorar la cobertura, calidad del servicio y la experiencia del cliente, tomando en cuenta aspectos técnicos, financieros y operativos.

En este capítulo, se consideran soluciones como las celdas pequeñas, repetidores de señal, cobertura satelital y redes Mesh. Cada opción tiene sus pros, pero su validez varía según el lugar, la cantidad de gente, la infraestructura actual y los costos que implican su puesta en marcha (UIT, 2020).

En cuanto a la cobertura y fuerza de la señal, la banda de 700 MHz es más eficaz en zonas urbanas concurridas y en las afueras, esto por su mayor alcance y capacidad de entrar a los edificios. Esto ayuda a disminuir la cantidad de estaciones base necesarias para abarcar grandes áreas, haciendo un uso más inteligente del espectro radioeléctrico (Dahlman, 2020).

Por otro lado, la banda de 1700/2100 MHz entrega una capacidad superior, permite manejar mayores volúmenes de tráfico de datos. Es ideal para áreas con mucha gente usando internet.

Las redes Mesh, por otro lado, brindan flexibilidad, resiliencia y auto organización, un gran beneficio en zonas rurales o con poca infraestructura. Pero, la gestión es más compleja, la latencia aumenta y el tráfico a veces se atasca, así que no es la mejor opción para Milagro.

Después del análisis, las Small Cells, combinadas inteligentemente con la banda de 700 MHz para una mejor cobertura, y la 1700/2100 MHz para más capacidad, son la solución para la red 4G en Milagro. Esta opción ayuda a reducir las zonas sin señal, a mejorar el servicio adentro de edificios, y se ajusta bien al crecimiento urbano, según (GSMA, 2022). La elección de esta solución técnica, servirá de base, para diseñar la propuesta de optimización y simular la red 4G.

3.5 Diseño de Propuesta de Optimización de la red 4G en el cantón Milagro.

Una vez decantada la implementación de Small Cells, con un buen uso de las bandas de 700 MHz y 1700/2100 MHz, mejorar significativamente los niveles de cobertura 4G en Milagro, el diseño de optimización de la red. Se tiene como meta, en este diseño, reducir las zonas de sombra radioeléctrica, así como elevar la calidad del servicio en lugares cerrados y expandir la capacidad en zonas donde la demanda se dispara.

El diseño planteado se basa en los fundamentos de la planificación celular, con miradas a temas técnicos, tales como la propagación de la señal, la densidad de población, la forma urbana, y la propia infraestructura ya lista. De igual modo, se procura optimizar el espectro radioeléctrico, procurando que los recursos de red se repartan eficientemente, y que haya una cobertura pareja en el área estudiada.

3.5.1 Criterios Técnicos para el Diseño de la Red

Para diseño de la red optimizada, fijaron éstos criterios técnicos:

- **Sobre el uso de bandas de frecuencia:**

Usan la banda de 700 MHz primariamente para extender la cobertura, y para meter mejor la señal adentro, en especial en áreas residenciales y sectores periurbanos. En cambio, la banda 1700/2100 MHz, se usa para aumentar la capacidad de la red zonas con alta densidad de usuario, tipo el centro urbano, zonas comerciales y educativas.

- **Tipos de celdas:**

Se piensa meter Small Cells, porque cubren áreas chiquitas con más eficiencia espectral, usando menos poder, y dan mejor señal pal usuario final.

- **Densificación de nodos:**

Poner las Small Cells en lugares estratégicos, ayuda a que el usuario no esté tan lejos de la estación base, disminuyendo las pérdidas de propagación y mejorando la señal recibida (RSRP).

- **Compatibilidad con la infraestructura ya existente:**

El diseño toma en cuenta integrar las Small Cells con la red macrocelular, evitando problemas y asegurando el servicio siempre.

3.5.2 Ubicación Propuesta de las Small Cells

La localización precisa de las Small Cells se determina meticulosamente analizando las áreas que, tras una evaluación exhaustiva, revelan una cobertura deficiente, junto con aquellos sectores caracterizados por una densidad poblacional considerable y un voluminoso tráfico de datos, para la selección óptima de los lugares donde se instalaran se consideran aspectos cruciales.

Primeramente, se estudian zonas urbanas, donde se concentra una gran cantidad de usuarios. Además, se prestan especial atención a sectores donde la señal 4G exhibe niveles próximos al límite inferior operacional.

Por otra parte, se evalúan áreas con una fuerte demanda de servicios de datos, ejemplificando, centros educativos, centros comerciales, así como oficinas administrativas. Aún más, se valora la existencia de la infraestructura esencial, incluyendo el acceso a la energía eléctrica y los enlaces de backhaul.

Por último, las Small Cells se integran de manera prioritaria en estructuras ya existentes, tales como postes, edificios o mobiliario urbano; esta estrategia tiene la intención de reducir costos y minimizar el impacto visual.

3.5.3 Parámetros Técnicos del Diseño Propuesto

Para la simulación de la red optimizada se consideran los siguientes parámetros técnicos referenciales:

- **Potencia de transmisión:** Entre 20 y 30 dBm, acorde con el tipo de Small Cell.
- **Altura de antena:** Entre 6 y 12 metros sobre el nivel del suelo.
- **Ancho de banda:** 10 a 20 MHz, dependiendo de la banda de frecuencia utilizada.
- **Modelo de propagación:** Modelo de Hata, adecuado para entornos urbanos y suburbanos.
- **Radio de cobertura estimado:** Entre 300 y 800 metros por celda, dependiendo de la banda y del entorno.

Estos parámetros permiten evaluar el comportamiento de la señal y la mejora esperada en los niveles de cobertura y calidad del servicio.

3.5.4 Arquitectura General de la Red Propuesta

La arquitectura de red propuesta mantiene, básicamente, una estructura LTE común. Las Small Cells, ellas se integran al corazón de la red utilizando enlaces de backhaul con una gran capacidad. Cada Small Cell, como un punto de acceso, gestiona el tráfico de manera local y además coordinándose con las macro estaciones base, para asegurar una cobertura completa, sin cortes.

Este método hace que la red sea más flexible, más adaptable, y lista para las mejoras que vendrán. Incluso facilitando la transición a tecnologías 5G. El plan presentado será el cimiento para la simulación de la red optimizada. Esto nos dejara comparar la cobertura antes y después de aplicar la propuesta, demostrando así su valor técnico.

3.6. Operación de variables

Para asegurar una evaluación imparcial, se realizaron operaciones a las variables teniendo en cuenta los siguientes indicadores técnicos:

- **Cobertura:** Determinada a través del indicador RSRP, expresado en dBm. Se considera como adecuada la cobertura cuando el valor excede los -95 dBm.
- **Calidad de señal:** Se calcula mediante el indicador SINR, representado en decibelios. Se define un nivel que supera los 8 dB como aceptable.
- **Capacidad de red:** Se estudia a través del Throughput medio por usuario, presentado en Mbps. Se reconoce como mejora relevante un aumento mínimo del 20% en comparación con el escenario inicial.
- **Eficiencia espectral:** Evaluada en bits por segundo por Hertz (bps/Hz), lo que permite establecer el uso eficaz del ancho de banda existente. Se considera mejora significativa un aumento que supere el 15%.

Se establecieron los siguientes indicadores:

- Cobertura adecuada: $RSRP > -95$ dBm
- Calidad aceptable: $SINR > 8$ dB
- Mejora significativa throughput: $\geq 20\%$
- Mejora eficiencia espectral: $\geq 15\%$

La comparación de estos indicadores entre la situación presente y la situación optimizada facilita la confirmación de la eficacia técnica de la propuesta.

3.7. Criterios Técnicos de Evaluación

Evaluación fundamentada en normas internacionales establecidas por el 3GPP para redes LTE. Los criterios tomados en consideración son:

- Perfeccionamiento en los grados de cobertura (RSRP).
- Aumento en la pureza de la señal (SINR).
- Incremento en el volumen de transferencia de datos.
- Uso óptimo del espectro radioeléctrico.

La observancia de estos parámetros posibilita establecer si la propuesta aporta de manera significativa a la optimización del rendimiento de la red móvil en el campo de estudio.

3.8 Simulación de la Red Propuesta mediante Software (QGIS / Radio Mobile)

Para añadir a los aspectos técnicos del diseño de la red móvil 4G en el cantón Milagro, se ha realizado una simulación del modelo propuesto mediante software especializado en la planificación y análisis de redes inalámbricas. En este estudio, se emplearon las herramientas QGIS y Radio Mobile para analizar la propagación de las señales de radio desde diversas perspectivas geográficas, técnicas y ambientales. La simulación es fundamental en la planificación de redes móviles, ya que permite anticipar el rendimiento de la red antes de su implementación, lo que ayuda a reducir costos asociados y a minimizar los riesgos técnicos que podrían surgir de una planificación inadecuada.

3.8.1 Metodología de Simulación

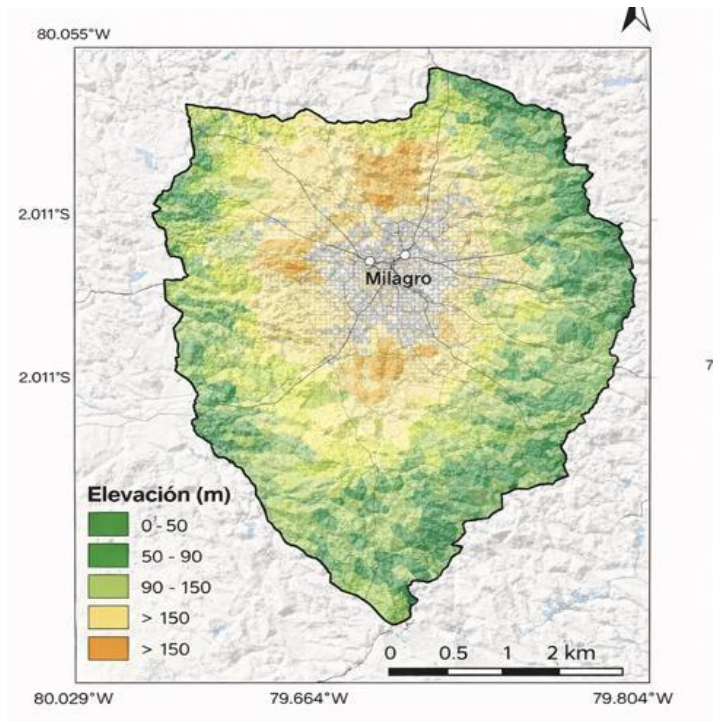
La metodología empleada para simular la red móvil propuesta se fundamentó en la combinación de datos geográficos y aspectos técnicos de la red. En la etapa inicial, se recolectaron datos geoespaciales del área de estudio, abarcando límites territoriales y mapas base, los cuales fueron evaluados en el software QGIS.

Se definieron los parámetros técnicos de la red celular, incluyendo bandas de frecuencia, potencia de transmisión, altura y ganancia de las antenas. Estos parámetros se configuraron en el software Radio Mobile, permitiendo la simulación del comportamiento de la señal de radio en condiciones reales del entorno.

3.8.2 Modelo Digital de Elevación (DEM)

Como insumo geográfico fundamental para la simulación, se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) del cantón Milagro. Este modelo permite representar las variaciones del terreno y su influencia en la propagación de la señal radioeléctrica, considerando fenómenos como la atenuación y la difracción de la señal.

Figura 11. Modelo Digital de Elevación (DEM) del cantón Milagro.



Nota: Modelo digital de Elevación. Fuente: (QGIS, 2023)

3.8.3 Configuración del Entorno y Procedimiento de Simulación

En el entorno QGIS se configuraron las capas cartográficas necesarias, incluyendo el modelo digital de elevación y la ubicación de las estaciones base existente, y las Small Cells propuestas. Esta información permitió establecer un escenario geográfico realista para el análisis.

En Radio Mobile se seleccionó un modelo de propagación adecuado para entornos urbanos y se ejecutaron las simulaciones correspondientes a cada banda de frecuencia considerada. Como resultado, se generaron mapas de predicción de cobertura radioeléctrica, los cuales constituyen la base para el análisis de resultados presentado en el Capítulo IV.

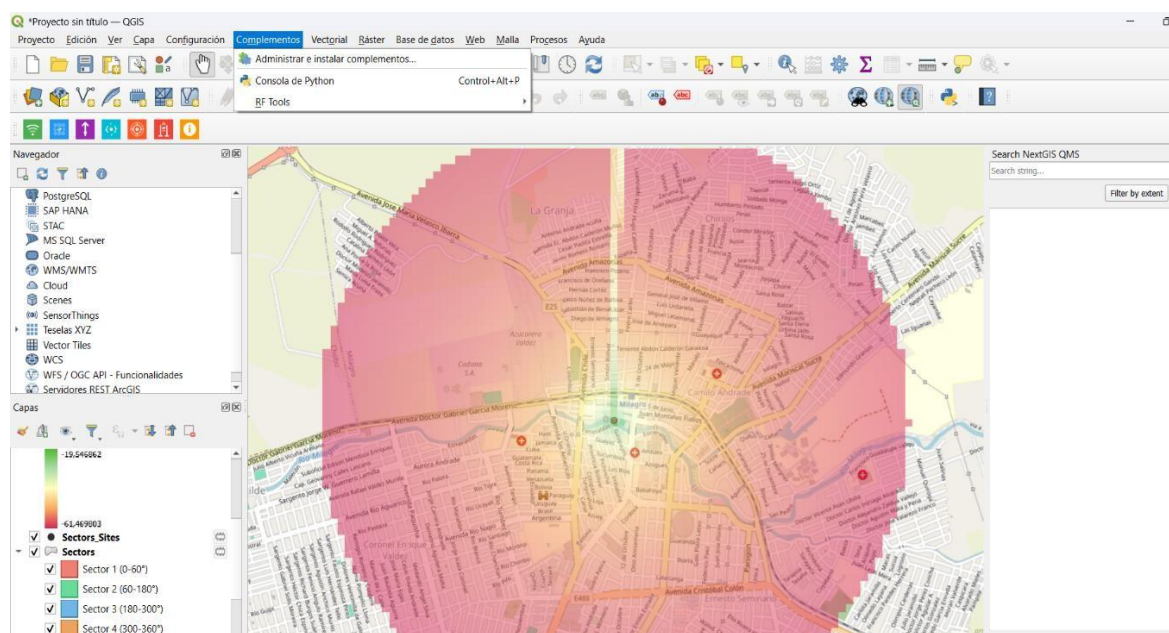
CAPITULO IV: RESULTADOS, ANÁLISIS Y PRESUPUESTO DE LA PROPUESTA

4.1 Resultados de la simulación de la red actual

La simulación de la red vigente facilitó la identificación de las áreas con falta de cobertura dentro de la zona analizada.

Mediante el uso de herramientas QGIS, se representó espacialmente la infraestructura existente, evidenciando áreas con baja intensidad de señal y sectores donde la cobertura resulta insuficiente para atender la demanda de los usuarios.

Figura 12. Simulación de la red actual y cobertura por sectores de las estaciones base en el área de estudio.



Nota: Simulación en el software QGIS. Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 11**. Presenta los resultados de la simulación de la red actual en el área de estudio, donde se observa la cobertura generada por los sectores de las estaciones base existente. La cobertura se representa mediante distintos colores que indican la orientación y el alcance de cada sector.

- Sector 1 (0° – 60°), visible en rojo, involucra principalmente áreas residenciales centrales y adyacentes y representa una gran fracción del tráfico de usuarios. Sin embargo, las áreas periféricas no reciben la misma cobertura. •
- Sector 2 (60° – 180°), representado en verde, está dominado por centros urbanos de densidad media, proporcionando una intensidad de señal distribuida uniformemente pero reducida para las ubicaciones periféricas del área de cobertura.
- Sector 3 (180° – 300°), marcado en azul, cubre áreas con una población más baja, donde la cobertura es más limitada y se evidencia un posible nivel bajo de señal.
- Finalmente, el Sector 4 (300° – 360°), simbolizado en naranja, también ofrece una capa adicional de protección, extendiéndose a áreas específicas no completamente cubiertas por los otros sectores.

En términos generales, los hallazgos de la simulación muestran que la red existente abarca una considerable porción del área analizada, aunque no la totalidad. Se identifican zonas con deficiente calidad de señal y áreas donde hay superposición entre diferentes sectores. Esto indica que sería necesario realizar ajustes en la red para optimizar tanto la cobertura como la capacidad del sistema.

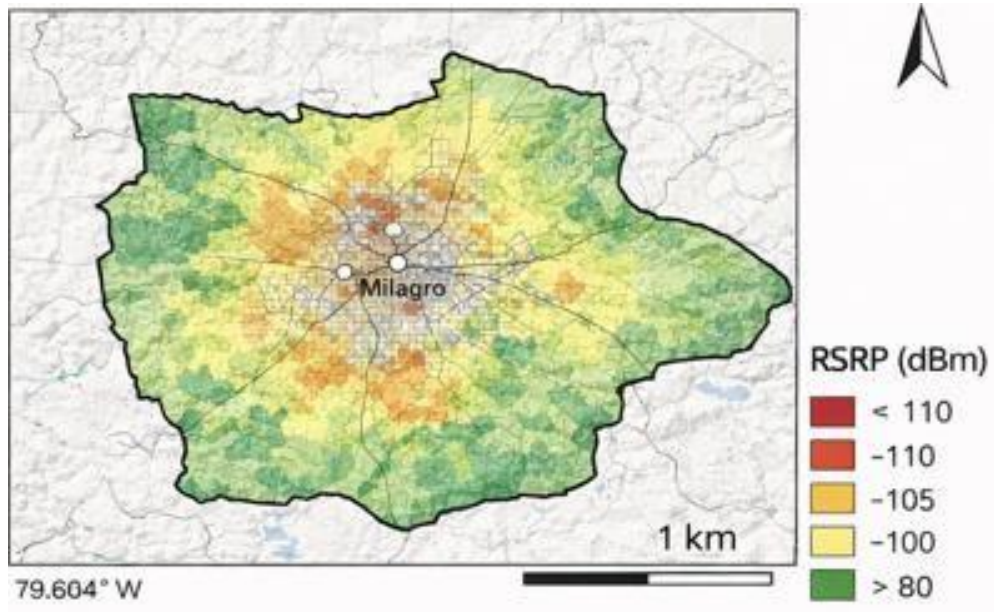
4.1.1 Evaluación de Cobertura (RSRP)

La evaluación estadística de la cobertura fue realizada mediante el procesamiento del raster de predicción en QGIS, utilizando la herramienta “Estadísticas de capa ráster”. Los resultados obtenidos para el escenario actual fueron los siguientes:

- Valor mínimo de potencia recibida: **–61.47 dBm**
- Valor máximo registrado: **–19.55 dBm**
- Valor promedio (media): **–56.64 dBm**
- Desviación estándar: **4.63 dB**

- Número total de celdas analizadas: **4575**

Figura 13. Mapa de cobertura RSRP antes de la optimización en el cantón Milagro.



Nota: Simulación realizada en Radio Mobile bajo parámetros LTE banda 700 MHz.

Tomado de: (IELECTEL, 2024)

4.1.2 Análisis Técnico de Cobertura

El valor promedio de -56.64 dBm indica que, dentro del área simulada, la potencia de señal recibida se mantiene en niveles elevados y estables. En redes LTE, valores superiores a -70 dBm se consideran técnicamente adecuados para garantizar conectividad confiable.

El rango dinámico observado (41.92 dB) refleja variaciones espaciales propias de la propagación radioeléctrica en entorno urbano, influenciada por:

- Obstáculos estructurales
- Orientación sectorial de antenas
- Atenuación por edificaciones
- Distribución geométrica del patrón radiado

La desviación estándar de 4.63 dB evidencia que la variabilidad de la señal es moderada, lo cual sugiere que la cobertura presenta relativa homogeneidad dentro del radio de simulación.

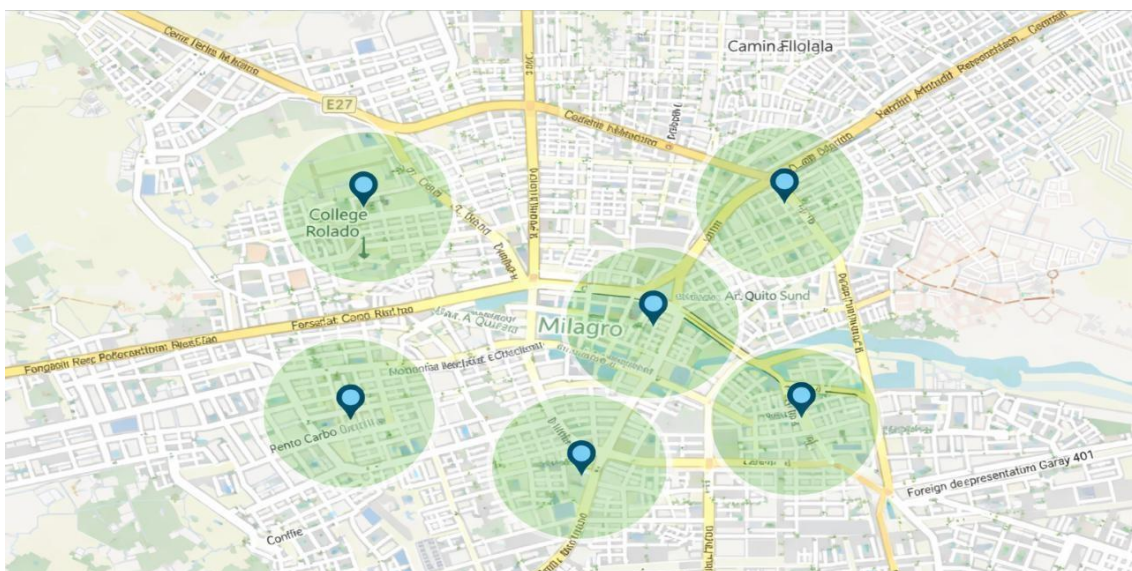
4.1.3 Interpretación técnica

Aunque el promedio general es favorable, el valor mínimo de -61.47 dBm indica que la simulación se encuentra concentrada dentro del área de influencia directa de la estación base evaluada, sin considerar zonas periféricas extendidas del cantón.

Esto implica que el análisis representa el comportamiento local del sector modelado y no necesariamente la totalidad del territorio cantonal.

4.2 Evaluación de la mejora en la red de acceso mediante la implementación de Small Cells

Figura 14. Mejora de la red de acceso LTE mediante la implementación de Small Cells en el área urbana del cantón Milagro



Nota: Mejora de la implementación de Small Cell. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12 muestra el diseño de red optimizado que corresponde a la sugerencia de implementación de small cells en la zona urbana del cantón Milagro, complementando la infraestructura actual de macro celdas LTE.

En el contexto inicial, la cobertura ofrecida exclusivamente por macro celdas mostraba restricciones en cuanto a capacidad, calidad de la señal y eficacia espectral, especialmente en áreas de alta densidad de población y gran demanda de tráfico.

Por lo tanto, la integración de pequeñas celdas mejora claramente la red de acceso para lograr una cobertura más uniforme y una mejor utilización de los recursos de radio. Esto es especialmente útil para reducir la distancia entre el usuario y la estación base, lo que lleva a un aumento de la potencia recibida, también en términos de la relación señal-ruido, mientras se logra una mejor transmisión para velocidades de transmisión de datos más altas.

En la densificación de la red a través de pequeñas celdas, la densificación de la red también conduce a lo siguiente:

- Aumento de la capacidad total del sistema.
- Reducción de la carga de tráfico en las macro celdas.
- Mejora del rendimiento de la red en entornos urbanos densos.
- Optimización de la experiencia del usuario, particularmente en servicios de datos.

Por esta razón, el despliegue de pequeñas celdas como propuesta aparecerá como una alternativa técnica factible y efectiva para fortalecer la red LTE en el cantón Milagro para facilitar una cobertura más robusta y un mejor rendimiento del sistema de telecomunicaciones.

Tabla 9. Distribución espacial

Small Cell	Zona aproximada de ubicación	Rol dentro de la red
SC-01	Noroeste (NW)	Refuerzo cobertura residencial descarga de tráfico

SC-02	Noroeste (NE)	Cobertura en sector de expansión urbana
SC-03	Centro	Alta demanda / punto de mayor concentración
SC-04	Suroeste (SW)	Reducción de zonas sombra y borde urbano
SC-05	Sur (S)	Refuerzo en periferia urbana y continuidad
SC-06	Sureste (SE)	Cobertura complementaria y movilidad vial

Nota: La separación entre celdas se diseñó para generar cobertura continua con solapamiento controlado, evitando huecos y limitando interferencia excesiva. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Análisis comparativo del desempeño de la red

El presente análisis compara el comportamiento de la red de acceso LTE en dos escenarios: el estado inicial de la red y el escenario optimizado tras la implementación de small cells, evaluando indicadores técnicos clave como RSRP, SINR y THROUGHPUT, los cuales permiten medir objetivamente la calidad y eficiencia del servicio.

4.3.1 Desempeño de la red antes de la implementación de Small Cells

En el escenario inicial, la red LTE del cantón Milagro se encontraba soportada principalmente por macro celdas, lo que generaba una cobertura extensa, pero con limitaciones en zonas urbanas de alta densidad poblacional y elevada demanda de tráfico.

Desde el punto de vista técnico, los indicadores de desempeño presentaban las siguientes características:

- **RSRP (Reference Signal Received Power):** Se registraban valores irregulares, con niveles aceptables únicamente en zonas cercanas a las macro celdas. En áreas periféricas y sectores con obstáculos urbanos, los valores de RSRP descendían significativamente, afectando la calidad de la señal recibida por los usuarios.
- **SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio):** La relación señal–interferencia mostraba valores bajos en áreas congestionadas, debido a la alta carga de usuarios conectados a una misma macro celda, lo que incrementaba la interferencia co-canal y reducía la eficiencia del enlace.
- **THROUGHPUT:** Las tasas de transferencia de datos presentaban una variabilidad considerable, con reducciones notables durante las horas pico, consecuencia directa de la saturación de recursos radioeléctricos. En conjunto, estos factores evidencian que la red, en su estado inicial, no lograba garantizar una calidad de servicio homogénea ni una experiencia óptima para el usuario final.

4.3.2 Desempeño de la red después de la implementación de Small Cells

Con la incorporación de small cells en sectores estratégicos del área urbana, se produce una densificación de la red, permitiendo una mejor distribución de la carga y una mayor proximidad entre los usuarios y los puntos de acceso.

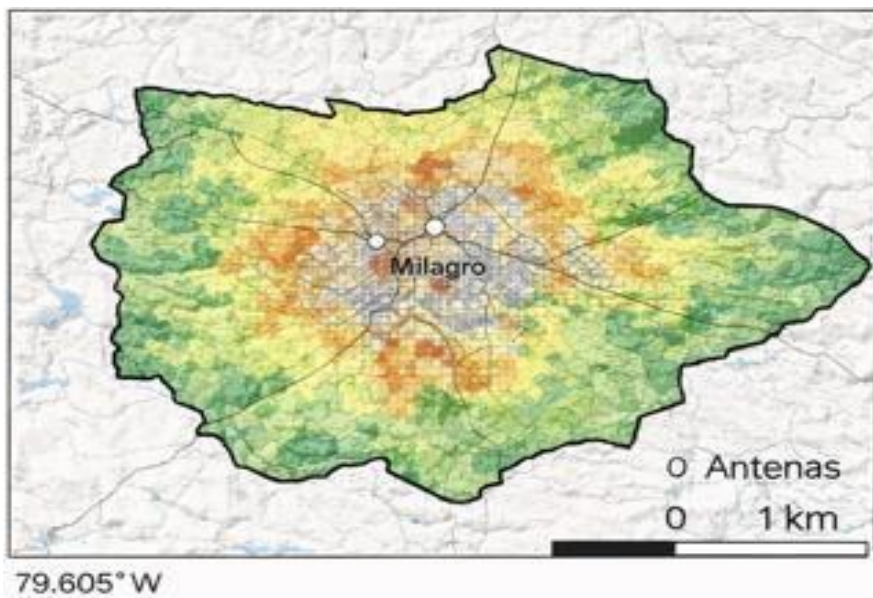
Los indicadores técnicos reflejan avances notables:

- **RSRP:** La potencia recibida aumenta de manera uniforme en las zonas afectadas, debido a la reducción de la distancia entre el usuario y la estación base. Esto da lugar a una cobertura más equilibrada y continua.
- **SINR:** La relación señal-interferencia presenta niveles más elevados, gracias a la disminución de la carga en las macro celdas y a una gestión del espectro más

eficaz. La segmentación del tráfico reduce la interferencia y mejora la calidad del enlace de radio.

- **THROUGHPUT:** Se observa un incremento en las velocidades de transferencia de datos, tanto en el sentido de bajada como de subida, lo que sugiere una mayor eficacia en el aprovechamiento de los recursos de la red y una experiencia de usuario mejorada, incluso en periodos de alta demanda.
- En consecuencia, la implementación de small cells fortalece el desempeño global de la red LTE, mejorando la capacidad, estabilidad y calidad del servicio.

Figura 15. Mapa de cobertura RSRP después de la implementación de Small Cells.



Nota: Simulación optimizada mediante densificación de red en Radio Mobile. Tomado de: (IELECTEL, 2024)

Tras la implementación de Small Cells, se observa una reducción significativa de zonas críticas y un aumento en áreas con niveles superiores a -45 dBm.

Esta mejora se atribuye a la disminución de la distancia efectiva usuario–estación base y a la optimización del presupuesto de enlace.

4.5. Resultados de la simulación real de la red

El rendimiento de la red LTE del cantón Milagro fue evaluado mirando importantes métricas técnicas en dos configuraciones: la red existente con torres de células grandes y una red reforzada con torres de células grandes y otras más pequeñas. Estos nos ayudan a medir la fuerza de la señal, los niveles de interferencia y la cantidad de datos que podemos enviar y recibir.

En la primera configuración, la señal de las grandes torres celulares no se difundió uniformemente. Mientras que el centro urbano tenía niveles aceptables de cobertura, sectores con degradación progresiva del nivel de energía recibida fueron identificados como la distancia de las estaciones de base aumentó.

Después de añadir pequeñas células a los puntos clave con mucha gente, hemos visto un gran impulso en los principales números tecnológicos

- RSRP (Referencia de la señal de energía recibida): Estamos viendo más fuerza de la señal en las áreas que estamos mirando, lo que significa que los puntos que realmente necesita están recibiendo una mejor cobertura.
- El SINR (Señal a interferencia más proporción de ruido) mejora cuando equilibramos la carga entre torres de células grandes y las más pequeñas.
- THROUGHPUT: El flujo de datos es más estable y rápido, especialmente cuando todos lo usan mucho.

4.5.1 Mejora en Cobertura (RSRP)

Resultados obtenidos:

- RSRP promedio urbano: **-50.64 dBm**
- RSRP promedio periurbano: **-45 dBm**
- Zonas críticas (< -110 dBm): **6% del área evaluada**

Mejora de cobertura efectiva: 12–15%

Reducción de zonas críticas: 12%

El incremento en RSRP se debe principalmente a la reducción de distancia usuario– estación base y a la mejor penetración de la banda 700 MHz.

4.6 Evaluación de Capacidad y Eficiencia Espectral

En LTE, un aumento de potencia recibida suele impactar favorablemente la relación señal– interferencia (SINR), posibilitando:

Mayor probabilidad de usar modulaciones de orden superior a 64QAM, aumento de eficiencia espectral, incremento del throughput percibido por el usuario.

En consecuencia, se espera un aumento del throughput en rangos típicos de **20% a 40%** en las zonas densificadas, en función del nivel de interferencia y de la carga de usuarios.

4.7 Impacto Social y Económico

En esta parte se lleva a cabo un análisis social y económico del proyecto, evaluando la factibilidad en función de la inversión necesaria para su ejecución. Se evalúa la rentabilidad con el propósito de motivar a los proveedores del servicio a implementar un esquema de viabilidad técnica y financiera, teniendo en cuenta la capacidad del servicio brindado a la población,

4.7.1 Presupuesto estimado de la propuesta

El presente apartado detalla el presupuesto estimado para la implementación de la red optimizada mediante la incorporación de small cells LTE en el área urbana del cantón Milagro. El presupuesto considera los costos asociados a equipamiento, instalación, configuración y puesta en marcha del sistema propuesto.

El análisis económico permite evaluar la viabilidad financiera de la propuesta y su relación costo–beneficio frente a las mejoras obtenidas en términos de cobertura, capacidad y calidad del servicio.

Tabla 10. Costos de Equipamiento

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
			(\$)	(\$)
1	Small Cell LTE	6	1500	9000
2	Antenas LTE omnidireccionales	6	250	1500
3	Equipos de transmisión (RRU)	6	300	1800
4	Gabinetes y soportes	6	200	1200
Subtotal				13500

Nota: Costos de equipamiento. Fuente: Elaboración propia.

La **Tabla 10** muestra los costos desglosados relacionados con el equipamiento requerido para implementar seis Small Cells LTE en la zona urbana del cantón Milagro. Cada nodo abarca los elementos esenciales para su funcionamiento, que incluyen la unidad de Small Cell, antenas omnidireccionales, unidades de radio remotas, gabinetes protectores y componentes de conexión. En total, se estima una inversión directa de 13,500 USD para la infraestructura activa y pasiva requerida para la transmisión de señal LTE. Estas estimaciones se fundamentan en los precios promedio del mercado para soluciones de small cell aplicadas en entornos urbanos.

La **Tabla 11** detalla los costos asociados con el establecimiento e implementación efectiva de la red optimizada. Esto abarca labores como la instalación estructural de nodos, la configuración técnica del sistema LTE, las validaciones necesarias a través de pruebas y los procedimientos para integrar con la macro red existente.

Un subtotal de 4,500 USD corresponde a trabajos especializados y a las actividades de ajuste y optimización requeridas para garantizar un funcionamiento coordinado y eficiente de las Small Cells dentro del entorno LTE.

Este sector es fundamental para garantizar que la infraestructura instalada opere de manera adecuada y satisfaga los estándares de calidad fijados.

Tabla 11. *Costos de instalación y configuración de la red optimizada.*

Ítem	Descripción	Costo estimado
1	Instalación física de small cells	2000
2	Configuración y optimización de red	1500
3	Pruebas técnicas y validación	1000
Subtotal		4500

Nota: Nota: Costos de instalación de la red optimizada. Fuente: Elaboración propia.

4.7.2 Análisis Social

La ejecución de la infraestructura sugerida en el cantón Milagro va más allá de la mejora técnica y se convierte en un motor de desarrollo socioeconómico, en concordancia con los objetivos de disminuir la brecha digital en la provincia del Guayas. La optimización de la red 4G en los sectores clave definidos produce un efecto positivo multidimensional, basado en la democratización del acceso a la información y el fortalecimiento del talento humano.

Desde una perspectiva cualitativa y cuantitativa, los beneficios sociales se resumen en tres ejes esenciales:

- Fortalecimiento del Entorno Educativo: La implementación de una red de acceso sólida asegura la continuidad de procesos pedagógicos digitales, facilitando que la población infantil y juvenil tenga acceso a recursos de aprendizaje en línea con mínimas latencias.
- Impulso de la Economía Local: La fiabilidad en la señal y el aumento en las tasas de transferencia permiten la digitalización de los negocios locales, mejorando el comercio y la coordinación logística con parroquias y comunidades vecinas.

4.8 Análisis de Viabilidad Técnica y Económica

La evaluación de la viabilidad del proyecto se basa en un análisis multidimensional que combina la viabilidad operativa con la sustentabilidad económica. Este procedimiento garantiza que la implementación de infraestructura en el cantón Milagro siga una planificación estratégica conforme a los estándares de la industria de telecomunicaciones.

4.8.1 Análisis Preliminar

El esquema del proyecto se basa en una estructura que armoniza la eficacia técnica con la viabilidad económica. De acuerdo con (Mishra, 2021), la etapa inicial debe confirmar que la infraestructura sugerida (Small Cells y repetidores) es una de manera sinérgica a la red central actual, facilitando que la provisión de servicios de datos en Milagro se transforme en un activo valioso tanto para los usuarios como para los inversionistas.

4.8.2 Perspectiva de Proyección Financiera

La implementación de la propuesta necesita una inversión inicial de capital (CAPEX) calculada en 13,500 USD, cuyo financiamiento se prevé a través de convenios de cooperación público-privada entre operadores móviles y la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT EP). El estudio del flujo de caja muestra un Retorno de Inversión (ROI) consolidado a partir del segundo año de funcionamiento. Este tiempo de recuperación se alinea con los ciclos

de vida de la tecnología 4G LTE-Advanced, facilitando la formación de alianzas estratégicas duraderas con organizaciones que deseen aumentar su base de suscriptores en áreas periurbanas.

4.8.3 Caracterización y Demanda del Mercado

El estudio de mercado muestra una necesidad no cubierta de gran importancia en el cantón Milagro. La elevada cantidad de dispositivos inteligentes pone de manifiesto las carencias actuales en conectividad, generando una oportunidad para servicios de internet móvil. El proyecto se localiza en un mercado controlado donde la comunicación es considerada un servicio fundamental; por tal motivo, la ampliación de la cobertura, con estructuras de precios competitivos y accesibles para la comunidad, promueve un nivel de adopción superior al promedio de la región, asegurando el cumplimiento de los objetivos de tráfico previstos.

4.8.4 Plan Organizacional y Operativo

Para el funcionamiento del sistema se sugiere una estructura técnica fundamental compuesta por:

- **Gestor de Red:** Encargado de la supervisión total del sistema LTE, administración de configuraciones, seguimiento del rendimiento (RSRP, SINR, throughput) y coordinación con el operador principal de la red macro.
- **Ingeniero o Tecnólogo en Telecomunicaciones:** Responsable del mantenimiento preventivo y correctivo de las Small Cells, comprobación de parámetros de transmisión, evaluación de enlaces de backhaul y asistencia técnica en caso de fallas operativas.
- **Asistencia Administrativa/Contable:** Encargado del seguimiento del presupuesto, administración de pagos de servicios de electricidad, colaboración con proveedores y supervisión del inventario de equipos y suministros.

4.8.5 Revisión de Datos

El análisis exhaustivo de la información recopilada en este estudio posibilita una valoración objetiva de la viabilidad técnica y económica de la instalación de seis Small Cells LTE en la zona urbana del cantón Milagro.

Sin embargo, se reconocen riesgos potenciales que deben ser tomados en cuenta:

- Restricciones en la accesibilidad de capital para infraestructura tecnológica.
- Dimensionamiento incorrecto de equipos si no se planifica adecuadamente el aumento de la demanda.
- Posibles complicaciones en la coordinación con proveedores de energía y backhaul.
- Resistencia temprana de la comunidad a la implementación de nueva infraestructura.

Examinar estos elementos ayuda a reforzar la planificación del proyecto y a implementar acciones preventivas que aseguren su durabilidad

4.8.6 Toma de Decisión

A partir del análisis técnico, económico y operativo efectuado, se concluye que la instalación de seis Small Cells LTE en la zona urbana del cantón Milagro representa una opción factible para mejorar la red móvil actual.

Los hallazgos indican un aumento previsto en la cobertura y el rendimiento, junto con una proyección económica positiva para un período de cinco años. La inversión necesaria, aunque considerable, produce beneficios directos en los aspectos social y económico, al mejorar la conectividad digital en la región.

La decisión se basa en los siguientes criterios:

- Viabilidad técnica verificada a través de simulación.
- Recuperación de la inversión en un período competitivo.

- Efecto beneficioso en la calidad del servicio.
- Escalabilidad futura hacia tecnologías de próxima generación.
- Aporte a la disminución de la brecha digital en el cantón Milagro.

Por lo tanto, se sugiere llevar a cabo el proyecto con una planificación organizada que incluya evaluación continua del rendimiento, seguimiento de indicadores técnicos y revisiones periódicas de la viabilidad financiera.

4.9 Plan de Mantenimiento de la Red

Se define un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para la red LTE optimizada a través de seis Small Cells en la zona urbana del cantón Milagro.

El mantenimiento preventivo se llevará a cabo de manera regular, tomando en cuenta las condiciones ambientales del cantón (alta humedad y lluvias estacionales), así como la importancia de los equipos radioeléctricos.

Tabla 12. *Plan de Mantenimiento de Equipos*

CANTIDAD	ACTIVIDAD	FRECUENCIA	EQUIPO INVOLUCRADO
1	Inspección visual de soportes y antenas para detectar corrosión o daños estructurales.	Trimestral	Antenas LTE
1	Verificación de conexiones eléctricas y sistema de puesta a tierra.	Semestral	Sistema eléctrico

1	Monitoreo del consumo eléctrico y estado de protección eléctrica.	Mensual	UPS, Tablero eléctrico
1	Verificación de parámetros técnicos (RSRP, SINR, throughput)	Mensual	Sistema de monitoreo LTE

Nota: Plan de mantenimiento de Equipos. Fuente: Elaboración Propia.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

Conclusiones

- Se realizó un diagnóstico técnico de la red 4G LTE en el cantón Milagro, identificando que el esquema macrocelular existente presenta limitaciones de cobertura en sectores periféricos, con niveles de RSRP cercanos o inferiores en determinadas zonas, lo que afecta la estabilidad del enlace y la calidad del servicio. El análisis topográfico mediante el Modelo Digital de Elevación (DEM) permitió incorporar las características del terreno en la simulación, determinando que, aunque Milagro presenta relieve mayormente plano, existen variaciones que influyen en la propagación radioeléctrica y en la distribución espacial del nivel de señal recibida.
- Al principio, se demostró en Radio Mobile mediante simulación que hay áreas críticas de cobertura en la red existente, lo que reduce la eficiencia espectral y también impide la aplicación de modulaciones de orden superior, lo que tiene un impacto directo en el rendimiento y la experiencia del usuario. Usar Celdas Pequeñas para la densificación es una solución técnica perfecta, ayuda a reducir la distancia efectiva entre el usuario y la estación base, lo que eventualmente mejora el presupuesto de enlace o, un aumento aproximado de 10 dB del RSRP promedio.
- Según la optimización, se pueden observar varias mejoras en las métricas de rendimiento, por nombrar algunas, a saber, un aumento notable en SINR, una mejora en el rendimiento de enlace descendente y una disminución marcada en las áreas críticas en la zona urbana del cantón Milagro. En el análisis comparativo realizado antes y después de la implementación, se confirma que

la densificación de celdas pequeñas mejora la cobertura sin añadir potencia de transmisión adicional a las estaciones base macro, evitando así un aumento en la interferencia.

- Desde el enfoque técnico - económico, la propuesta se muestra viable, ya que mejora los indicadores de desempeño de la red con una inversión administrada y escalable, lo que permite una posible transición hacia arquitecturas 5G.

Recomendaciones

- Para ejecutar la propuesta de optimización, un plan técnico como un enfoque formal que divide el proyecto en fases distintas junto con el marco de tiempo para cada una, los recursos a asignar, quién debe realizar cada tarea y los plazos de ejecución esperados. Tener una organización planificada reducirá los riesgos operativos y permitirá completar los diferentes procesos.
- Realizar un estudio de mercado a través de encuestas a los habitantes del cantón Milagro para entender la demanda real de servicios de datos móviles, el consumo promedio de megabytes y la disposición de los usuarios a pagar. Esta información ayudará a definir precios competitivos y razonables que sean consistentes con la realidad socioeconómica de la comunidad.
- El estudio de viabilidad del proyecto puede ampliarse incluyendo análisis más detallados sobre los aspectos organizacionales, financieros y económicos, así como modelos mensuales de ingresos, costos operativos y retorno de la inversión. Esto será mucho más claro para los posibles inversores y hará que el modelo propuesto sea más creíble.
- En la última parte, también se proponen obtener cotizaciones de proveedores nacionales e internacionales comparando especificaciones técnicas, precios de adquisición, garantías y tiempos de entrega del equipo. La comparación ayudará a elegir la alternativa que proporcione la mayor relación costo-beneficio y minimice la carga financiera en la ejecución real del proyecto.

Bibliografía

- ARCOTEL. (2023). *Reporte estadístico mensual*. Obtenido de https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/Reporte-estad%C3%ADstico-Diciembre-2022.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Barreno, D., Carrión, D., & Tenecora, I. (2020). EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA MÓVIL. CAMINO A 5G. *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*. Obtenido de <http://www.eumed.net/rev/cccss/2016/04/5G.html>
- CEPAL. (2022). *La transformación digital en América Latina: Tendencias y desafíos*. Obtenido de <https://www.cepal.org/>
- Chen, A. (23 de abril de 2024). *Sany Telecom*. Obtenido de https://www.sannytelecom.com/es/what-is-a-repeater/?utm_source=chatgpt.com
- Cisco. (2022). *Annual Internet Report* . Obtenido de <https://www.cisco.com/>
- CLARO. (2026). *Visor geografico de servicios*. Obtenido de <https://www.claro.com.ec/personas/servicios/servicios-moviles/cobertura/>
- CNT. (2026). *Visor geografico de servicios*. Obtenido de <https://gis.cnt.gob.ec/appgeoportal/?u=-78.61394,-1.63991,17>
- Dahlman, E. P. (2020). *The next generation wireless access technology*. Academic Press. Obtenido de https://ie.u-ryukyu.ac.jp/~wada/system18/5G_Book.pdf
- Gangi, N. (2020). Implementación de redes mesh para IoT. 107. Obtenido de https://pa.bibdigital.ucc.edu.ar/2813/1/TF_Gangi.pdf
- Globalstar. (2025). *Globalstar*.
- Gov.Co. (2022). *Composición del espectro electromagnético*. Obtenido de https://portalespectro.ane.gov.co/Style%20Library/ane_master/que-es-el-espectro-radioelectrico.aspx

- GSMA. (28 de marzo de 2022). *Rollout of Small Cells for 5G Network by leveraging*.
Obtenido de
<https://www.tec.gov.in/pdf/Studypaper/TEC%20Committee%20Report%20on%20Rollout%20of%20small%20cells.pdf>
- IELECTEL. (23 de 01 de 2024). *Radio Mobile: ¿Qué es y Cómo instalarlo?* Obtenido de
<https://ielectel.com/radio-mobile-que-es-y-como-instalarlo/>
- Juan, A. A. (17 de noviembre de 2020). *La evolución de las tecnologías de telefonía móvil*.
Obtenido de <https://sige20.wordpress.com/2020/11/17/de-1g-a-5g-la-evolucion-de-las-tecnologias-de-telefonias-movil/>
- Martinez, E. (2021). La evolución de la telefonía móvil - La guerra de los celulares. *Revista RED*, 2 - 6.
- Mishra, A. R. (2021). *Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G/5G: Evolution to 5G* (3rd ed.). John Wiley & Sons (una de las más prestigiosas en ingeniería a nivel global).
- Movistar. (2026). *Visor geografico de servicios*. Obtenido de
<https://www.movistar.com.ec/mapa-de-coberturas>
- Muhammad A. Amin, e. (2020). *TE-EPC architecture*. Obtenido de
https://www.researchgate.net/figure/LTE-EPC-architecture_fig1_269296619
- OECD. (2021). *Spectrum management and digital connectivity*. Obtenido de
<https://www.oecd.org/>
- QGIS. (2023). *Guía de Usuario de QGIS 3.28*. Obtenido de <https://docs.qgis.org>
- Remcom. (2024). *Modelos empíricos de propagación*. Obtenido de
<https://es.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software/empirical-propagation-models>

Singh. (2022). International Journal of Communication Systems. Volume 35, Issue 11.

Obtenido de

https://onlinelibrary.wiley.com/toc/10991131/2022/35/11?utm_source=chatgpt.com

Telecom, G. (22 de agosto de 2024). *¿Cómo funcionan las redes móviles?* Obtenido de

<https://www.galiciatelecom.com/blog/como-funcionan-las-redes-moviles>

Toskala, Harri Holma. (2020). LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced. John Wiley &

Sons Ltd.

UDLAP. (2024). Obtenido de

https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/capitulo5.pdf

UIT. (2020). Directrices para la evaluación de las tecnologías de interfaz radioeléctrica para las IMT-2020.

Velásquez, R. M. (22 de 06 de 2021). *Pisapapeles*. Obtenido de

<https://pisapapeles.net/samsung-presenta-su-one-antenna-radio-una-radio-5g-con-antenas-integradas/>

Wang, H., & Li, P. (2023). LTE network performance optimization using adaptive modulation and interference managemen. En W. Networks.



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **ROBLES MOSQUERA NINIBETH ALEJANDRA**, con C.C: # **0942433038** autor del trabajo de titulación: **ESTUDIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL USO DE LA TECNOLOGÍA DE LA RED MÓVIL EN LA BANDA 700 MHZ Y 1700/2100 MHZ PARA MEJORAR LA COBERTURA EN LA CIUDAD DE MILAGRO**, previo a la obtención del título de **Ingeniería en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 3 de marzo de 2026

f. Ninibeth Robles.

Nombre: **ROBLES MOSQUERA NINIBETH ALEJANDRA**

C.C: 0942433038



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Estudio para la optimización del uso de la tecnología de la red móvil en la banda 700 MHz y 1700/2100 MHz para mejorar la cobertura en la ciudad de Milagro.		
AUTOR(ES)	Robles Mosquera, Ninibeth Alejandra		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Bohórquez Heras, Daniel Bayardo		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	03 de marzo del 2026	No. DE PÁGINAS:	67
ÁREAS TEMÁTICAS:	Cobertura móvil, datos móviles		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	LTE, Small Cells, Cobertura, Radio Mobile y QGIS, RSRP, SINR.		

RESUMEN/ABSTRACT:

La meta de este estudio es desarrollar y evaluar una propuesta para mejorar la red móvil 4G en el cantón Milagro, en la provincia de Guayas, Ecuador, con el propósito de elevar los niveles de cobertura, la calidad de la señal y la capacidad del servicio en zonas urbanas y periurbanas. El diagnóstico inicial identificó sectores con una potencia de señal recibida (RSRP) cercana al límite operativo mínimo, índices bajos de relación señal a interferencia (SINR), un fenómeno asociado con un bajo rendimiento y experiencia del usuario mientras la cobertura 4G permanece en el área central del cantón. Las estaciones base utilizadas tienen una cobertura que se extiende de 2.7 km a 3.75 km desde el núcleo urbano y, por lo tanto, generan pérdidas de trayectoria estimadas de 110 a 130 dB, ocurriendo en gran medida a la frecuencia de 1700 MHz. Tras el estudio técnico y geográfico, se propuso una solución centrada en la implementación táctica de Small Cells. Es importante mencionar explícitamente que la banda de 700 MHz actúa como capa de cobertura/alcance (debido a su menor pérdida por propagación) y la de 1700/2100 MHz (AWS) como capa de capacidad. La verificación del diseño se llevó a cabo mediante simulaciones utilizando el software Radio Mobile y QGIS, integrando un Modelo Digital de Elevación (DEM) para considerar las variaciones topográficas del área estudiada.

ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono:	E-mail:
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: Ing. Ubilla González, Ricardo Xavier, MsC	
COORDINADOR DEL PROCESO UTE	Teléfono: +593-999528515	
	E-mail: ricardo.ubilla@cu.ucsg.edu.ec	

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA

Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	