



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

**FACSISTEL
INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**Monitoreo espectral de la red móvil 4G
LTE en la banda AWS utilizando SDR
HackRF One aplicado en entornos
diferenciados.**

**Yagual Cevallos John Santiago
Cordero Muñoz Diana Elizabeth**

Dirigido por:
Ing. Daniel Jaramillo Chamba, M.Sc.

La Libertad – 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Ronald Rovira Jurado, Ph. D.
DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Daniel Jaramillo Chamba, M.Sc.
TUTOR

Ing. Luis Amaya Farino, M.Sc.
DOCENTE ESPECIALISTA

Ing. Luis Amaya Farino, M.Sc.
DOCENTE GUÍA UIC

Ing. Corina Raquel Gonzabay De La A, M.Sc.
SECRETARIA



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por **Yagual Cevallos John Santiago y Cordero Muñoz Diana Elizabeth**, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones.

La Libertad, a los 08 días del mes de Septiembre del año 2026

TUTOR

Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Yagual Cevallos John Santiago y Cordero Muñoz Diana Elizabeth

DECLARAMOS QUE:

El trabajo de Titulación, **Monitoreo espectral de red móvil 4G LTE en la banda AWS utilizando SDR HackRF One aplicado en entornos diferenciados** previo a la obtención del título en Ingeniero en Tecnologías de la Información, 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.

La Libertad, a los 08 días del mes de Septiembre del año 2026

AUTORES



Yagual Cevallos John



Cordero Muñoz Diana



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA**
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado **Monitoreo espectral de la red móvil 4G LTE en la banda AWS utilizando SDR HackRF One aplicado en entornos diferenciados**, presentado por los estudiantes, **Yagual Cevallos John Santiago y Cordero Muñoz Diana Elizabeth** fue enviado al Sistema Antiplagio, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 7%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



Certificado de análisis

Computación | Tagpires | UPSE-ECU

Trabajo de Integración Curricular Yagual y Cordero

ID: 7951000004C07911630420F000004235a20295



7%

Texto sospechoso

Nombre del Estudiante: Trabajo de Integración Curricular Yagual y Cordero
Tamaño del archivo original: 32.11 KB
Número de palabras: 33.104

Deposante: DANIEL JARAMILLO CHAMBA
Fecha de depósito: 23 de agosto de 2023
Tipo de carga: Integración
Fecha de fin de análisis: 21 de agosto de 2023

TUTOR

Ing. Daniel Jaramillo Chamba, M.Sc.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Yagual Cevallos John Santiago y Cordero Muñoz Diana Elizabeth**

Autorizamos a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.[1]

Cedo los derechos en línea patrimoniales de artículo profesional de alto nivel con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando nuestros derechos de autor

Santa Elena, a los 08 días del mes de Septiembre del año 2026

AUTORES



Yagual Cevallos John



Cordero Muñoz Diana

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por permitirme seguir con vida y haberme brindado las fuerzas y las ganas de culminar esta etapa. Agradezco en especial al Ing. Daniel Jaramillo, M.Sc., docente tutor, por su acompañamiento constante, su guía y la paciencia con la que orientó cada etapa de este proceso. Asimismo, extendiendo mi gratitud al Ing. Luis Amaya, M.Sc., docente especialista, por sus valiosos aportes técnicos y observaciones que enriquecieron significativamente este proyecto de titulación. Quiero también reconocer a todos los docentes que contribuyeron con sus conocimientos y experiencia a mi formación profesional. A mis queridos compañeros con quienes compartí esta etapa universitaria, en especial a mi compañera de tesis, Diana Cordero, con quien pasé noches en vela brindándonos apoyo mutuo.

A todos ellos, gracias por su apoyo, el cual fue fundamental para alcanzar esta meta académica.

John Santiago Yagual Cevallos

De manera especial, expreso mi más profundo agradecimiento a mi suegra, quien ha sido un pilar fundamental durante este proceso. A pesar de sus propias responsabilidades como docente, siempre encontró la manera de brindarme su apoyo, especialmente con el cuidado y acompañamiento de mi familia. Gracias por dedicar su tiempo, por estar pendiente de nosotros, por sus atenciones en el hogar y por esos gestos de cariño que hicieron más llevadero este

camino. Su ayuda, generosidad y disposición fueron una motivación constante para poder continuar con mis estudios y alcanzar esta meta. A toda la familia de mi esposo, gracias por sus consejos, por creer en mí, por acompañarme y alentarme a no rendirme. Este logro también refleja una parte del apoyo y amor que me brindaron durante todo este proceso. Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad y a los docentes de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, quienes compartieron sus conocimientos, experiencias y valores, contribuyendo significativamente a mi formación profesional.

Asimismo, agradezco a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, colaboraron en la realización de este trabajo y contribuyeron al logro de esta importante meta académica. A todos, muchas gracias.

Diana Elizabeth Cordero Muñoz

DEDICATORIA

Dedico este logro a mi madre, Mirian Cevallos, quien, con su apoyo moral, económico y un sacrificio constante, hizo posible cada paso de este camino. Su esfuerzo silencioso y su fe inquebrantable en mí fueron el sostén que me permitió llegar hasta aquí a pesar de las dificultades. No existen palabras suficientes para expresar la gratitud que siento por su entrega incondicional. Este trabajo se lo dedico a mis familiares, amigos, y en especial a mi querida Lisbeth, quien me apoyó incondicionalmente durante esta etapa.

De igual manera, dedico este trabajo de titulación a mí mismo por haber alcanzado esta meta con la esperanza de que sea el primero de muchos éxitos en mi vida profesional.

John Santiago Yagual Cevallos

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por guiar mis pasos, darme la fortaleza para no rendirme ante las dificultades y bendecirme con la oportunidad de cumplir este sueño. A mi esposo, porque fuiste el primero en creer en mí y el principal promotor de esta travesía. Gracias por motivarme a iniciar este camino, por apoyarme en cada desafío y por nunca dejar que renunciara a mis metas. Este logro también es tuyo, porque sin tu amor, confianza y apoyo incondicional no habría sido posible. Te amo.

A mis hijos, quienes son el motor de mi vida y la razón por la que nunca dejé de luchar. Cada esfuerzo, cada noche de desvelo y cada sacrificio tuvieron como propósito brindarles un mejor futuro.

Este logro también les pertenece a ustedes. A mis padres, por ser el ejemplo más grande de perseverancia. A mi madre, por su apoyo incondicional y por cuidar de mis hijos con tanto amor mientras yo cumplía con mis estudios, brindándome la tranquilidad necesaria para seguir adelante y regresar cada día con la esperanza de alcanzar esta meta. A mi padre, que con su responsabilidad y entrega a la vida me enseñó a nunca rendirme y a luchar por mis sueños con disciplina y constancia. Gracias por ser mi inspiración y por inculcarme los valores que hoy me permiten celebrar este logro. Este triunfo también les pertenece.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que creyeron en mí y me impulsaron a hacer realidad este sueño. Muchas gracias.

Diana Elizabeth Cordero Muñoz

RESUMEN

La presente investigación implementa un sistema de monitoreo espectral de la red móvil 4G LTE en la banda AWS mediante el dispositivo SDR HackRF One y el software GNU Radio, aplicado en entornos rural, urbano, costero y montañoso del cantón Santa Elena. El sistema permite capturar, procesar y analizar señales radiofrecuencia mediante técnicas de procesamiento digital de señales, obteniendo parámetros relacionados con la intensidad y calidad de la señal. Complementariamente, se empleó la aplicación G-NetTrack Lite para registrar parámetros de cobertura y calidad de la red. Los resultados obtenidos permitieron comparar el comportamiento de las señales en los diferentes escenarios geográficos y establecer variaciones asociadas a las condiciones de propagación, obstáculos y características propias de cada entorno. La investigación presenta una metodología basada en tecnologías SDR y software de código abierto como alternativa para el monitoreo y análisis espectral de redes móviles.

Palabras clave: 4G LTE, Monitoreo espectral, SDR HackRF One, GNU Radio

ABSTRACT

This research implements a spectral monitoring system for the 4G LTE mobile network in the AWS band using the HackRF One SDR device and GNU Radio software, applied across rural, urban, coastal, and mountainous environments in the Santa Elena canton. The system enables the capture, processing, and analysis of radiofrequency signals using digital signal processing techniques, yielding parameters related to signal strength and quality. Additionally, the G-NetTrack Lite application was used to record network coverage and quality parameters. The results allowed for a comparison of signal behavior across the different geographical scenarios and the identification of variations linked to propagation conditions, obstacles, and the specific characteristics of each environment. The study presents a methodology based on SDR technologies and open-source software as an alternative for the spectral monitoring and analysis of mobile networks.

Keywords: 4G LTE, Spectral monitoring, HackRF One SDR, GNU Radio

ÍNDICE GENERAL

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN CERTIFICACIÓN	2
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	4
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO.....	5
AUTORIZACIÓN.....	6
AGRADECIMIENTO	7
DEDICATORIA.....	9
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
ÍNDICE GENERAL	13
ÍNDICE DE FIGURAS.....	16
ÍNDICE DE TABLAS.....	19
ÍNDICE DE ECUACIONES	21
ÍNDICE DE ANEXOS	21
ABREVIATURAS.....	23
CAPÍTULO I: ASPECTOS INTRODUCTORIOS	25
1.1 Título	25
1.2 Introducción	25
1.3 Antecedentes	26
1.4 Descripción del proyecto	28
1.5 Objetivos	31
1.5.1 Objetivo general	31
1.5.2 Objetivos específicos	31
1.6 Justificación	32
1.7 Alcance del proyecto	33
1.8 Metodología	34
1.8.1 Enfoque mixto	34
1.8.2 Diseño experimental y tecnológico	35
1.8.3 Tipo de investigación.....	35

1.8.4 Aplicaciones y herramientas.....	35
1.8.5 Población y muestra	37
1.8.6 Procedimiento.....	37
1.8.7 Técnicas de análisis de datos	38
CAPÍTULO II: MARCO CONCEPTUAL	40
2.1 Fundamentos del espectro radioeléctrico	40
2.2 Procesamiento digital de señales en GNU Radio	40
2.2.1 Filtros digitales	41
2.2.1.1 Filtro pasa bajos (low pass filter).....	41
2.2.1.2 Filtro pasa altos (high pass filter)	41
2.2.1.3 Filtro pasa banda (band pass filter).....	41
2.2.1.4 Filtro rechaza banda (band reject filter o notch filter).....	42
2.3 Tecnología: Software-Defined Radio (SDR)	42
2.3.1 Ventajas del SDR	43
2.4 Antena telescópica portátil ANT500.....	44
2.5 Estándar LTE (4G)	45
2.5.1 Características y beneficios clave de la tecnología LTE	45
2.5.2 La arquitectura LTE	46
2.5.3 Interfaces.....	47
2.5.4 Características técnicas de LTE	48
2.6 Bandas de frecuencia de LTE	49
2.7 Herramientas de software para el monitoreo espectral	50
2.7.1 G-NetTrack Lite	50
2.7.2 GNU Radio.....	54
2.8 Herramientas de hardware para el monitoreo espectral	55
2.8.1 LimeSDR.....	55
2.8.2 HackRF One	57
2.9 Revisión sistemática y análisis comparativo.....	59
2.9.1 Categoría A: plataformas SDR y hardware de monitoreo espectral	59

SDR	2.9.2 Categoría B: software, herramientas y marcos de procesamiento para LTE con	64
	2.9.3 Categoría C: técnicas de detección y medición espectral	66
	2.9.4 Categoría D: inteligencia artificial y aprendizaje automático aplicado al espectro	69
	2.9.5 Categoría E: estándares técnicos, normativa y marcos regulatorios	74
ESPECTRAL	CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO	82
	3.1 Preparación técnica del sistema.....	82
	3.2 Desarrollo del sistema en GNU Radio.....	82
	3.2.1 Configuración del sistema en GNU Radio para los escenarios de estimación	82
	3.3 Explicación del diagrama de bloques en el entorno de GNU Radi.....	90
	3.4 Ejemplo de cálculo aplicado: Verificación numérica de la SNR.....	112
	3.5 Procedimiento experimental	113
	3.5.1 Protocolo general de estimación.....	113
	3.5.2 Parámetros registrados durante las mediciones.....	114
	3.5.3 Características de la antena utilizada durante las mediciones	115
	CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	117
	4.1 Resultados del monitoreo espectral obtenidos con GNU Radio (HackRF One)	117
	4.1.1 Zona urbana.....	117
	4.1.2 Zona rural	126
	4.1.3 Zona costera	133
	4.1.4 Zona montañosa	141
	4.2 Resultados obtenidos con G-NetTrack Lite	150
	4.2.1 Indicadores de cobertura zona urbana (G-NetTrack Lite)	150
	4.2.2 Indicadores de cobertura zona rural (G-NetTrack Lite).....	153
	4.2.3 Indicadores de cobertura zona costera (G-NetTrack Lite)	156
	4.2.4 Indicadores de cobertura zona montañosa (G-NetTrack Lite)	158
	4.3 Comparación referencial de los resultados entre GNU Radio y G-NetTrack Lite ..	161
	4.3.1 Comparación de resultados entre GNU Radio y G-NetTrack Lite zona urbana	161

4.3.2 Comparación de resultados entre GNU Radio y G-NetTrack Lite zona rural	165
4.3.3 Comparación de resultados entre GNU Radio y G-NetTrack Lite zona costera	168
4.3.4 Comparación de resultados entre GNU Radio y G-NetTrack Lite zona montañosa	171
4.4 Discusión de resultados.....	174
4.4.1 Análisis estadístico descriptivo.....	175
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	183
Conclusiones	183
Recomendaciones	185
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	186
ANEXOS	193
Anexo A: instalación y configuración del entorno de desarrollo	193
A.1 Preparación técnica	193
A.2 Instalador de Python	193
A.3 Instalación de librerías.....	200
A.4 Instalación de software adicional.....	202
A.5 Instalación de GNU Radio	209
Anexo B: evidencia fotográfica de las mediciones	214

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: topología del sistema de monitoreo espectral.....	29
Figura 2: Conjunto de radio definida por software (SDR) y antena ANT500	42
Figura 3: SDR ideal	43
Figura 4: SDR práctico	44
Figura 5: ANT500 - la antena telescópica para HackRF One o Yard Stick One	44
Figura 6: Arquitectura LTE: estructura, componentes y funciones clave	45
Figura 7: Arquitectura de red de acceso LTE.....	47
Figura 8: Diagrama de la pila de protocolos del plano de control en la interfaz S1.	47
Figura 9: Diagrama de la pila de protocolos del plano de control en la interfaz X2-C.	48

Figura 10: Registro de parámetros LTE con G-NetTrack Lite: monitoreo de señal y calidad en tiempo real	50
Figura 11: Placa LimeSDR	56
Figura 12: Propiedades de la variable samp_rate.	83
Figura 13: Propiedades de la variable Frecuencia_central.	83
Figura 14: Propiedades de la variable de ancho de banda (Bandwidth).	84
Figura 15: Diagrama de bloques en GNU Radio.	90
Figura 16: Bloque Osmocom Source.	92
Figura 17: Propiedades del bloque Osmocom Source.	92
Figura 18: Procesamiento digital de señal (DSP).	94
Figura 19: Propiedades del bloque Low Pass Filter.	96
Figura 20: Propiedades del bloque QT GUI Frequency Sink	96
Figura 21: Propiedades del bloque QT GUI Waterfall Sink.	97
Figura 22: Propiedades del bloque Valve.	97
Figura 23: Propiedades del bloque File Sink.	98
Figura 24: Estimación de potencia de banda ancha (RSSI / RSRP)	98
Figura 25: Bloques con relación directa con la rama 2 del sistema.	101
Figura 26: Propiedades del bloque Complex to Mag ²	102
Figura 27: Propiedades del bloque Moving Average.	102
Figura 28: Propiedades del bloque QT GUI Time Sink.	103
Figura 29: Propiedades del bloque Probe Signal.	103
Figura 30: Propiedades del bloque Log10.	104
Figura 31: Propiedades del bloque Probe Signal.	104
Figura 32: Propiedades del bloque QT GUI Number Sink.	105
Figura 33: Propiedades del bloque Subtract.	105
Figura 35: Propiedades del bloque Frequency Xlating FIR Filter.	109
Figura 36: Propiedades del bloque Complex to Mag ²	109
Figura 37: Propiedades del bloque Moving Average.	109
Figura 38: Propiedades del bloque Log10.	110
Figura 39: Propiedades del bloque QT GUI Number Sink.	110
Figura 40: Propiedades del bloque Probe Signal.	111
Figura 41: Propiedades del bloque QT GUI Number Sink (SNR).	111
Figura 42: Propiedades del bloque Probe Signal.	111
Figura 43: Fotografía del entorno de la zona urbana	118
Figura 44: Captura del mapa Google Earth Pro con la ubicación de los tres puntos y del eNodeB de referencia.	118
Figura 45: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona urbana, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 300 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:09	121

Figura 46: Espectrograma de ocupación espectral a 300 metros de distancia del eNodeB de la zona urbana en la fecha del 21/07/2026 a las 8:09	122
Figura 47: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona urbana, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 150 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:10.....	123
Figura 48: Espectrograma de ocupación espectral a 150 metros de distancia del eNodeB de la zona urbana en la fecha del 21/07/2026 a las 8:13	124
Figura 49: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona urbana, banda 4 LTE (2110-2155 MHz) a 15 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 07/07/2026 a las 12:45	124
Figura 50: Espectrograma de ocupación espectral a 15 metros de distancia del eNodeB de la zona urbana en la fecha del 07/07/2026 a las 12:45	126
Figura 51: Fotografía del entorno zona rural	127
Figura 52: Captura del mapa en Google Earth Pro con la ubicación de los tres puntos de medición y del eNodeB de referencia.	127
Figura 53: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona rural, banda 4 LTE (2125-2140 MHz) a 300 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 9:31	130
Figura 54: Espectrograma de ocupación espectral a 300 metros de distancia del eNodeB de la zona rural en la fecha del 21/07/2026 a las 9:31	130
Figura 55: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona rural, banda 4 LTE (2125-2140 MHz) a 150 metros de distancia del eNodeB 21/07/2026 a las 9:35	131
Figura 56: Espectrograma de ocupación espectral a 150 metros de distancia del eNodeB de la zona rural 21/07/2026 a las 9:35	132
Figura 57: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona rural, banda 4 LTE (2125-2140 MHz) a 15 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 07/07/2026 a las 12:19	132
Figura 58: Espectrograma de ocupación espectral a 15 metros de distancia del eNodeB de la zona rural en la fecha del 07/07/2026 a las 12:10.....	133
Figura 59: Fotografía del entorno zona costera	134
Figura 60: Captura del mapa en Google Earth Pro con la ubicación de los tres puntos y del eNodeB de la zona costera.....	134
Figura 61: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona costera, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 300 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:38.....	138
Figura 62: Espectrograma de ocupación espectral a 300 metros de distancia del eNodeB de la zona costera en la fecha del 21/07/2026 a las 8:38.	138
Figura 63: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona costera, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 150 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:28.....	139
Figura 64: Espectrograma de ocupación espectral a 150 metros de distancia del eNodeB de la zona costera en la fecha del 21/07/2026 a las 8:28	140
Figura 65: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona costera, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 15 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 07/07/2026 a las 10:43	140

Figura 66: Espectrograma de ocupación espectral a 15 metros de distancia del eNodeB de la zona costera en la fecha del 07/07/2026 a las 10:43	141
Figura 67: Fotografía del entorno zona montañosa	142
Figura 68: Captura del mapa en Google Earth Pro con la ubicación de los tres puntos de medición y del eNodeB de referencia	142
Figura 69: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona montañosa, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 300 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:46	146
Figura 70: Espectrograma de ocupación espectral a 300 metros de distancia del eNodeB de la zona montañosa en la fecha del 21/07/2026 a las 8:46	147
Figura 71: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona montañosa, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 150 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:51	147
Figura 72: Espectrograma de ocupación espectral a 150 metros de distancia del eNodeB de la zona montañosa en la fecha del 21/07/2026 a las 8:51	148
Figura 73: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona montañosa, banda 4 LTE (2110-2155 MHz) a 15 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 07/07/2026 a las 11:20	149
Figura 74: Espectrograma de ocupación espectral a 15 metros de distancia del eNodeB de la zona montañosa en la fecha del 07/07/2026 a las 11:20.	149
Figura 75: Gráficas comparativas por puntos de zona urbana	164
Figura 76: Gráficas comparativas por puntos de zona rural	166
Figura 77: Gráficas comparativas por puntos de zona costera	170
Figura 78: Gráficas comparativas por puntos de zona montañosa	173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Descripción y utilidad de las herramientas a utilizar en el presente trabajo.	35
Tabla 2: Bandas LTE más utilizadas según el estándar 3GPP TS 36.101	49
Tabla 3: Características de G-NetTrack Lite y G-NetTrack Pro.	52
Tabla 4: Tabla técnica comparativa.	54
Tabla 5: Datos técnicos de LimeSDR	56
Tabla 6: Tabla técnica comparativa HackRF One y LimeSDR.....	58
Tabla 7: Síntesis de los estudios revisados sobre monitoreo espectral con tecnología SDR. ..	78
Tabla 8: Principales variables del sistema GRC	82
Tabla 9: Variables para la zona montañosa	84
Tabla 10: Variables para la zona urbana.....	86
Tabla 11: Variables para la zona costera	87
Tabla 12: Variables para la zona rural	88

Tabla 13: Configuración del bloque Osmocom	93
Tabla 14: Variables registradas durante la prueba experimental	114
Tabla 15: Características de la antena	115
Tabla 16: Indicadores obtenidos (GNU Radio/HackRF One) de la zona urbana	119
Tabla 17: Indicadores obtenidos (GNU Radio/HackRF One) zona rural.	128
Tabla 18: Indicadores obtenidos (GNU Radio/HackRF).	135
Tabla 19: Indicadores obtenidos (GNU Radio/HackRF One)	143
Tabla 20: Mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona urbana.....	150
Tabla 21: Captura de las mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona urbana	150
Tabla 22: Mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona rural.	153
Tabla 23: Captura de las mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona rural.....	154
Tabla 24: Mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona costera	156
Tabla 25: Captura de las mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona costera	157
Tabla 26: Mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona montañosa	158
Tabla 27: Captura de las mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona montañosa	160
Tabla 28: Comparación del indicador RSSI.....	162
Tabla 29: Comparación del indicador RSRP	162
Tabla 30: Comparación del indicador RSRQ.....	163
Tabla 31: Comparación del indicador SNR	163
Tabla 32: Comparación del indicador RSSI.....	165
Tabla 33: Comparación del indicador RSRP	165
Tabla 34: Comparación del indicador RSRQ.....	166
Tabla 35: Comparación del indicador SNR	166
Tabla 36: Comparación del indicador RSSI.....	168
Tabla 37: Comparación del indicador RSRP	168
Tabla 38: Comparación del indicador RSRQ.....	169
Tabla 39 : Comparación del indicador SNR	169
Tabla 40: Comparación del indicador RSSI.....	171
Tabla 41: Comparación del indicador RSRP	171
Tabla 42: Comparación del indicador RSRQ.....	172
Tabla 43: Comparación del indicador SNR	172

Tabla 44: RSSI	178
Tabla 45: RSRP	179
Tabla 46: RSRQ	180
Tabla 47: SNR.....	181

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Señal coseno discreta en tiempo	29
Ecuación 2: Señal coseno discreta normalizada por frecuencia de muestreo.....	29
Ecuación 3: Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon	30
Ecuación 4: Reconstrucción de señal continua a partir de muestras discretas (forma relacionada con el teorema de muestreo de Shannon).	30
Ecuación 5: Transformada de Fourier.....	30
Ecuación 6: Transformada discreta de Fourier con ventana (Windowed DFT).	95
Ecuación 7: Densidad espectral de potencia (power spectral density, PSD).	95
Ecuación 8: Potencia instantánea de una señal discreta en representación I/Q.	100
Ecuación 9: Potencia promedio en tiempo discreto	100
Ecuación 10: Indicador de intensidad de señal recibida relativa (RSSI relativo).....	100
Ecuación 11: Señal discreta desplazada en frecuencia (frequency shift en dominio discreto).	107
Ecuación 12: Convolución discreta (filtrado de señal o modelado de ruido).	107
Ecuación 13: Nivel relativo de ruido (en escala logarítmica).....	108
Ecuación 14: Relación señal-ruido (signal-to-noise ratio, SNR).	108
Ecuación 15: Cálculo del número de muestras	116
Ecuación 16: Media aritmética	176
Ecuación 17: Varianza muestral.....	176
Ecuación 18: Desviación estándar (s) — medida de variabilidad	176
Ecuación 19: Intervalo de confianza (IC) al 95%	177

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: instalación y configuración del entorno de desarrollo

Figura A 1. Una captura del explorador de archivos de windows en la ruta.	193
Figura A2: GNU Radio Components MMX.	194
Figura A 3: Instalador de Python.	194
Figura A 4: Captura de pantalla del símbolo del sistema	195
Figura A 5: Instalador de Python	195
Figura A 6: Selección de la carpeta de instalación de Python.	196

Figura A 7: Selección de componentes de Python.	197
Figura A 8: Configuración personalizada de Python	198
Figura A 9: Proceso de carga de la instalación de Python.	198
Figura A10: Instalación completa de Python.	199
Figura A11: Atajo al símbolo de sistemas de (windows).	200
Figura A12: Terminal del símbolo de sistemas de windows.	200
Figura A13: Corrección de errores del símbolo de sistemas de windows.	201
Figura A 14: Instalador de wxPython-common-3.0.2.0.win-amd64.ReleaseDLL.	203
Figura A 15: Ejecución de wxPython-common-3.0.2.0, primera ventana	203
Figura A 16: Ejecución de wxPython-common-3.0.2.0, segunda ventana.	204
Figura A 17: Ejecución de wxPython-common-3.0.2.0, tercera ventana.	204
Figura A 18: Ejecución de wxPython-common-3.0.2.0, cuarta ventana.	205
Figura A 19: Ejecutable del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015.	205
Figura A 20: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, primera ventana.	206
Figura A 21: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, segunda ventana.	206
Figura A 22: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, tercera ventana	207
Figura A 23: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, cuarta ventana.	207
Figura A 24: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, quinta ventana.	208
Figura A 25: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, sexta ventana.	208
Figura A 26: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, séptima ventana	209
Figura A 27: Instalador del software uhd 3.9.6 (release_x64) VS2015, octava ventana.	209
Figura A 28: Instalador del software gnuradio_3.7.11_win64	210
Figura A 29: Instalador del software GNU Radio, primera ventana.	210
Figura A30: Instalador del software GNU Radio, segunda ventana.	211
Figura A31: Instalador del software GNU Radio, tercera ventana.	211
Figura A32: Instalador del software GNU Radio, cuarta ventana.	212
Figura A33: Instalador del software GNU Radio, quinta ventana.	212
Figura A 34: Ejecutable del software GNU Radio 1.	213
Figura A 35: Ejecutable del software GNU Radio 2.	213
Figura A 36: Interfaz del software GNU Radio.	213

Anexo B: fotografías de las mediciones

ANEXO B1: Zona costera – estimación con SDR en sitio.....	214
ANEXO B2: Zona montañosa – estimación con SDR en sitio.....	215
ANEXO B3: Zona rural – estimación con SDR en sitio	216
ANEXO B4: Zona urbana – estimación con SDR en sitio	217

ABREVIATURAS

3GPP: Third Generation Partnership Project

ARFCN: Absolute Radio Frequency Channel Number

AWS: Advanced Wireless Services

BW: Bandwidth (ancho de banda)

CA: Carrier Aggregation (agregación de portadoras)

DL: Downlink (enlace descendente)

eNB: Evolved NodeB / eNodeB (estación base LTE)

FFT: Fast Fourier Transform (Transformada rápida de Fourier)

GNSS: Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite)

GNU: GNU's Not Unix

GPS: Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)

LTE: Long Term Evolution

MHz: Megahertz (megahercio)

PCI: Physical Cell Identity (identidad física de celda)

PSD: Power Spectral Density (densidad espectral de potencia)

QoS: Quality of Service (calidad de servicio)

RF: Radio Frequency (radiofrecuencia)

RSSI: Received Signal Strength Indicator (indicador de intensidad de señal recibida)

RSRP: Reference Signal Received Power (potencia recibida de la señal de referencia)

RSRQ: Reference Signal Received Quality (calidad recibida de la señal de referencia)

SDR: Software-Defined Radio (radio definida por software)

SNR: Signal-to-Noise Ratio (relación señal-ruido)

TA: Timing Advance (avance de temporización)

UE: User Equipment (equipo de usuario)

UL: Uplink (enlace ascendente)

ADC: Analog-to-Digital Converter (convertidor analógico-digital)

dB: Decibel (decibelio)

dBm: Decibel-milliwatt (decibelio referido a un milivatio)

GUI: Graphical User Interface (interfaz gráfica de usuario)

IQ: In-phase and Quadrature (en fase y cuadratura)

I/Q: In-phase/Quadrature (componentes en fase y cuadratura)

CAPÍTULO I: ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1 Título

Monitoreo espectral de la red móvil 4G LTE en la banda AWS utilizando SDR HackRF One aplicado en entornos diferenciados.

1.2 Introducción

El crecimiento de las tecnologías de comunicación inalámbrica ha transformado la manera en que las personas interactúan, trabajan, estudian y acceden a los servicios digitales (GNU Radio Project, 2024). En la actualidad, las redes móviles constituyen uno de los principales medios para el intercambio de información y favorecen el desarrollo de aplicaciones como la educación virtual, la telemedicina, las videoconferencias y el Internet de las cosas (IoT) (ITU, 2023). En este contexto, la tecnología 4G LTE (Long Term Evolution) se ha consolidado como uno de los estándares de comunicación móvil más utilizados debido a su alta velocidad de transmisión de datos, su eficiencia espectral y su capacidad para ofrecer una mejor calidad de servicio (QoS).

No obstante, el desempeño de una red 4G LTE puede variar en función de diversos factores, entre ellos, las características geográficas del entorno, la densidad poblacional, la ubicación de las estaciones base, la presencia de obstáculos físicos y las condiciones de propagación de la señal (Rappaport et al., 2022). Estas variaciones hacen necesario disponer de herramientas que permitan monitorear y analizar el comportamiento del espectro radioeléctrico, obteniendo información objetiva sobre la calidad de la señal y las condiciones de cobertura en diferentes escenarios (Goldsmith, 2022).

En este ámbito, la radio definida por software (SDR) representa una alternativa flexible y de bajo costo para la captura y procesamiento de señales de radiofrecuencia (Wireless Innovation Forum, 2023). A diferencia de los equipos tradicionales de estimación, un sistema SDR permite implementar mediante software gran parte de las funciones de procesamiento de señales, facilitando la adquisición, visualización y análisis del espectro radioeléctrico en tiempo real. Entre las plataformas de software libre disponibles, GNU Radio proporciona un entorno de desarrollo basado en diagramas de bloques que posibilita la implementación de algoritmos de procesamiento

digital de señales (GNU Radio Project, 2024) para la generación de espectrogramas, análisis en frecuencia y aplicación de filtros digitales.

La presente investigación se centra en el monitoreo y análisis espectral de redes móviles 4G LTE en la banda AWS (Advanced Wireless Services) mediante el dispositivo HackRF One y el software GNU Radio, complementando las mediciones con la aplicación G-NetTrack Lite (Gyokov Solutions, 2024) para la obtención de parámetros de cobertura y calidad de la señal. El estudio contempla la realización de mediciones en diferentes entornos geográficos de la provincia de Santa Elena, para comparar métricas como la Relación Señal-Ruido (SNR) y otras variables asociadas al comportamiento de la red en escenarios urbanos, rurales, costeros y montañosos (GNU Radio Project, 2024).

La provincia de Santa Elena presenta una diversidad geográfica que la convierte en un entorno adecuado (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones [ARCOTEL], 2023) para el desarrollo de estudios comparativos sobre propagación y comportamiento de señales inalámbricas. Las diferencias entre sus distintos escenarios permiten analizar cómo las características del entorno influyen en las mediciones obtenidas mediante tecnologías SDR, lo cual genera información útil para comprender el comportamiento espectral de las redes móviles bajo condiciones reales de operación.

Finalmente, este trabajo aporta una metodología basada en tecnologías de código abierto para el monitoreo espectral de redes 4G LTE, demostrando la aplicación del dispositivo HackRF One y del entorno GNU Radio como herramientas de apoyo para la captura y el análisis de señales de radiofrecuencia (GNU Radio Project, 2024). Además, los resultados alcanzados ofrecen una referencia útil para futuras indagaciones relacionadas con el monitoreo espectral, la comparación de parámetros de cobertura y el uso de plataformas SDR en el ámbito académico e investigativo (Rappaport et al., 2022).

1.3 Antecedentes

La aplicación de la radio definida por software (SDR) ha adquirido mayor importancia en el monitoreo espectral de redes móviles, debido a la disponibilidad de plataformas de bajo costo y

herramientas de procesamiento digital de señales que permiten analizar el comportamiento del espectro radioeléctrico en tiempo real (Ulversø, 2010).

En el ámbito nacional, se desarrolló una investigación en la Universidad Politécnica Salesiana, titulada “*Diseño de un algoritmo para el análisis y monitoreo de parámetros de señales LTE 4G utilizando la plataforma de Radio Definida por Software (USRP)*”. El objetivo fue implementar un algoritmo para analizar señales LTE mediante una plataforma SDR. Los resultados demostraron que una adecuada separación entre portadoras mejora la relación señal-interferencia (SIR), respaldando el uso de plataformas SDR para el análisis de redes LTE. Este trabajo constituye un referente para la presente investigación por su aplicación del monitoreo de señales mediante tecnología SDR (Ruiz, 2015).

En la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), se desarrolló un prototipo para el monitoreo de parámetros de calidad de señal en sistemas de radio troncalizada utilizando un equipo USRP y LabVIEW. Los resultados evidenciaron que el sistema permite automatizar la adquisición y almacenamiento de datos de potencia y calidad de señal, demostrando la utilidad de las plataformas SDR para aplicaciones de monitoreo inalámbrico (Mejía & Sanabria, 2021).

En el ámbito internacional (Sorecau et al., 2023) implementaron un sensor portátil basado en ADALM Pluto y GNU Radio para el monitoreo de redes LTE. El estudio evidenció la capacidad de un dispositivo SDR de bajo costo para obtener mediciones de densidad espectral de potencia (PSD), destacando su potencial de aplicación en actividades académicas y de investigación. Estos resultados constituyen un referente para el empleo de tecnologías SDR en aplicaciones de monitoreo espectral.

Por otra parte, (Helbet et al., 2021) desarrollaron un sistema de monitoreo espectral en tiempo real utilizando plataformas USRP y LimeSDR. Los autores concluyeron que la implementación permitió realizar un seguimiento continuo de la ocupación espectral mediante técnicas basadas en la Transformada Rápida de Fourier (FFT), lo que evidenció la confiabilidad de las plataformas SDR para el análisis de redes LTE.

De acuerdo con los antecedentes revisados, se evidencia que las investigaciones nacionales e internacionales respaldan el uso de plataformas SDR para el monitoreo y análisis espectral de

redes inalámbricas (Sorecau et al., 2023; Helbet et al., 2021). Sin embargo, son limitados los estudios desarrollados en el contexto ecuatoriano que emplean el dispositivo HackRF One y el software GNU Radio para analizar el comportamiento de redes 4G LTE en distintos entornos geográficos. En este sentido, la presente investigación busca aportar evidencia experimental mediante la comparación de métricas de cobertura y comportamiento espectral en la provincia de Santa Elena.

1.4 Descripción del proyecto

Este proyecto se centra en el monitoreo y análisis del comportamiento espectral de la red móvil 4G LTE en la banda AWS, en las zonas de estudio establecidas, mediante el uso del SDR HackRF One y GNU Radio. Su propósito es analizar la calidad de la señal bajo diferentes condiciones geográficas y comparar el comportamiento de la cobertura y la calidad de la señal en los distintos entornos. Para ello, se desarrollará una plataforma de monitoreo espectral basada en el SDR HackRF One y GNU Radio, destinada a la captura, el filtrado y el análisis de señales 4G LTE.

Para esta investigación, se ejecutarán mediciones de parámetros de cobertura y calidad de señal mediante la herramienta G-NetTrack Lite, lo que permite obtener información relacionada con intensidad de señal, medidas de radiofrecuencia y comportamiento de la red LTE en los distintos sectores de estudio. Estas mediciones permitirán establecer un estudio preliminar de las condiciones de cobertura presentes en cada entorno geográfico.

El proyecto contempla la implementación de filtros específicos en GNU Radio para disminuir los componentes no deseados durante el procesamiento de las señales capturadas, con el fin de mejorar el análisis espectral en las distintas zonas geográficas de estudio. Finalmente, los datos obtenidos permitirán generar información técnica relevante sobre la intensidad de la señal, la cual será analizada en el cantón Santa Elena para caracterizar y comparar el comportamiento espectral de la red móvil 4G LTE en los diferentes entornos estudiados.

A continuación, se presenta la topología general del sistema implementado para el monitoreo espectral.

Figura 1: topología del sistema de monitoreo espectral



Nota. Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 1, el sistema de monitoreo espectral inicia con la toma de muestras de las señales radioeléctricas con el dispositivo SDR HackRF One, luego pasa por el software GNU Radio donde se procesa y filtra la señal para finalmente obtener su representación espectral y realizar el análisis correspondiente.

Ecuaciones

El procesamiento digital de las señales capturadas mediante el dispositivo SDR se basa en diversos principios matemáticos del proceso digital de señales, los cuales se describen a continuación.

Conversión A/D: Es el proceso mediante el cual una señal analógica continua se transforma en una señal digital discreta.

$$x[n] = A * \cos(2\pi F_n T + \theta)$$

Ecuación 1: Señal coseno discreta en tiempo

Teniendo en cuenta que $F_s = \frac{1}{T}$ se obtiene:

$$x[n] = A * \cos\left(\frac{2\pi F_n}{F_s} + \theta\right)$$

Ecuación 2: Señal coseno discreta normalizada por frecuencia de muestreo.

Teorema de Nyquist: Establece que, para reconstruir perfectamente una señal analógica a partir de sus muestras digitales, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia más alta presente en la señal original.

$$F_N = F_S \geq 2 * f_{\text{máx}}$$

Ecuación 3: Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon

Donde:

- F_N es la frecuencia de Nyquist.
- F_S es la frecuencia de muestreo.
- $f_{\text{máx}}$ es la frecuencia máxima.

Conversión D/A: Se utiliza para transformar señales digitales discretas en señales analógicas continuas, permitiendo que los sistemas digitales interactúen con el mundo físico.

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] * \sin\left(\frac{t * n * T_S}{T_S}\right)$$

Ecuación 4: Reconstrucción de señal continua a partir de muestras discretas (forma relacionada con el teorema de muestreo de Shannon).

Donde:

- $x[n]$ es una señal discreta.
- t es el tiempo.
- T_S es el periodo de muestreo.

Transformada de Fourier: La transformada de Fourier descompone una función en una suma de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias. Esto permite analizar qué componentes de frecuencia están presentes en una señal.

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

Ecuación 5: Transformada de Fourier

Las ecuaciones mostradas constituyen el fundamento matemático del proceso digital de señales implementado en esta indagación. La conversión analógico-digital consiste en representar las señales capturadas por el dispositivo SDR en formato digital, el teorema de Nyquist-Shannon establece el criterio de muestreo para evitar el aliasing y la Transformada de Fourier facilita la base para el análisis espectral de las señales. Estos principios permiten obtener y analizar las métricas utilizadas para comparar el comportamiento de la red 4G LTE en los diferentes entornos evaluados.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Implementar un sistema de monitoreo espectral basado en SDR HackRF One y GNU Radio para analizar comparativamente el comportamiento y los parámetros de cobertura de la red 4G LTE en la banda AWS en entornos diferenciados: rural, urbano, costero y montañoso del cantón Santa Elena.

1.5.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un sistema de monitoreo y recepción de señales utilizando SDR HackRF One y GNU Radio para la captura, filtrado y análisis de las señales 4G LTE en la banda AWS.
- Realizar mediciones de parámetros de cobertura y calidad de la red 4G LTE en la banda AWS mediante el uso de G-NetTrack Lite en entornos rural, urbano, costero y montañoso.
- Medir parámetros espectrales de la señal 4G LTE en la banda AWS mediante GNU Radio y el dispositivo HackRF One, obteniendo su representación en frecuencia y espectrograma para su análisis.
- Analizar los resultados obtenidos de las mediciones y capturas espectrales realizadas en los diferentes entornos geográficos para comparar variaciones en la red 4G LTE en la banda AWS.
- Revisar trabajos previos que estén relacionados con el monitoreo espectral de las redes móviles mediante el uso de dispositivos SDR para establecer un marco de referencia teórico que ayude a sustentar el desarrollo del presente trabajo.

- Comparar las métricas de cobertura y los parámetros espectrales obtenidos en entornos rurales, urbanos, costeros y montañosos caracterizando el comportamiento de la red 4G LTE en la banda AWS.

1.6 Justificación

El monitoreo espectral de redes móviles constituye una actividad fundamental para conocer el comportamiento de las señales de radiofrecuencia y evaluar parámetros relacionados con la cobertura y la calidad del servicio. Factores como la propagación de la señal, la presencia de obstáculos, las condiciones geográficas y las interferencias pueden influir en las mediciones obtenidas, por lo que resulta importante disponer de herramientas que permitan analizar estas variaciones en diferentes entornos (Rappaport, 2002).

En este contexto, la presente investigación propone implementar un sistema de monitoreo espectral basado en el dispositivo SDR HackRF One y el software GNU Radio para analizar el comportamiento de la red 4G LTE en la banda AWS en entornos rurales, urbanos, costeros y montañosos del cantón Santa Elena. Además, se empleará la aplicación G-NetTrack Lite para obtener parámetros de cobertura y calidad de la señal, permitiendo comparar las métricas registradas por ambas herramientas y caracterizar el comportamiento de la red en los diferentes escenarios evaluados.

Desde el punto de vista profesional, el estudio aporta una metodología de monitoreo espectral basada en tecnologías de bajo costo y de código abierto, que puede ser utilizada para la adquisición y análisis de señales de radiofrecuencia en investigaciones relacionadas con redes móviles (Reed, 2002). La información obtenida contribuirá a ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de la red 4G LTE en distintos entornos geográficos, constituyendo un referente para futuros estudios de monitoreo espectral.

En el ámbito académico, la investigación fortalece la aplicación de conceptos de procesamiento digital de señales y radio definida por software (SDR), demostrando el potencial de herramientas como GNU Radio y HackRF One para el desarrollo de prácticas experimentales y proyectos de investigación en el área de las telecomunicaciones (Reed J. M., 2002; Blossom E.,

2004). Además, proporciona una metodología reproducible para la captura, procesamiento y análisis espectral de señales LTE mediante plataformas de código abierto.

La relevancia de esta investigación también se mantiene en el crecimiento del acceso a los servicios móviles e internet en el Ecuador. De acuerdo con los reportes estadísticos publicados por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL, 2024), el crecimiento de los servicios móviles evidencia la necesidad de evaluar continuamente la calidad y disponibilidad de las redes inalámbricas en diferentes zonas geográficas. Además, los informes internacionales de Freedom House y Opensignal muestran diferencias en la experiencia de conectividad y desempeño de las redes móviles, resaltando la importancia de realizar mediciones técnicas que permitan caracterizar la calidad del servicio.

Finalmente, los resultados obtenidos servirán como base para futuras investigaciones relacionadas con el monitoreo espectral de redes móviles mediante tecnologías SDR, proporcionando información técnica sobre el comportamiento de la red 4G LTE en la provincia de Santa Elena y contribuyendo al fortalecimiento de actividades académicas y de investigación en el área de las telecomunicaciones (Reed J. M. , 2002; Opensignal, 2024).

1.7 Alcance del proyecto

El proyecto de titulación tiene como alcance evaluar el comportamiento espectral de la red móvil 4G LTE en la banda AWS en zonas específicas del cantón Santa Elena, mediante el uso del dispositivo SDR HackRF One y el software GNU Radio. El sistema permitirá capturar, filtrar y analizar señales de radiofrecuencia para evaluar la cobertura y la calidad de la señal en diferentes entornos geográficos, así como identificar los factores que influyen en el comportamiento de la red.

La toma de muestras se llevará a cabo en entornos no controlados, donde variables externas como el ruido radioeléctrico, la temperatura, la humedad y las características del entorno pueden influir en las mediciones obtenidas. Por esta razón, se implementarán filtros digitales en GNU Radio para reducir componentes no deseados durante el procesamiento de las señales y mejorar la confiabilidad de la información obtenida. La configuración de los filtros y de los demás parámetros del sistema se realizará mediante GNU Radio, utilizando bloques de procesamiento que permitirán

establecer la comunicación entre los diferentes componentes del sistema de monitoreo espectral (ITU-R, 2019).

El sistema de monitoreo espectral de redes LTE-4G incluye una interfaz en el software GNU Radio que permite la interacción entre el dispositivo SDR HackRF One y el usuario. Esta interfaz facilita el ajuste de ciertos parámetros para la adquisición de las señales, lo cual permite ajustar la toma de muestras en distintos rangos de frecuencia. Si bien el estudio se centra en la banda AWS empleada por la red 4G LTE, el dispositivo HackRF One puede operar en un rango aproximado de 1 MHz a 6 GHz. Por esta razón, el sistema podría adaptarse para futuras investigaciones en otras bandas de frecuencia.

El sistema desarrollado constituye una herramienta de apoyo para actividades académicas e investigaciones relacionadas con el monitoreo espectral de redes móviles. La información obtenida permitirá analizar parámetros como la intensidad de la señal, el espectrograma y la potencia recibida, contribuyendo al estudio del comportamiento de la red 4G LTE mediante tecnologías SDR.

No obstante, se debe tener en cuenta que el sistema se enfoca únicamente en el monitoreo espectral de la red móvil 4G LTE en la banda AWS en las distintas zonas establecidas; por tanto, el sistema no podrá manipular, ajustar, modificar ni controlar la red ni los factores que influyen en su comportamiento.

1.8 Metodología

1.8.1 Enfoque mixto

Desde el enfoque cuantitativo, la investigación se centra en capturar y analizar datos espectrales medidos en tiempo real mediante el dispositivo SDR HackRF One y la herramienta G-NetTrack Lite, obteniendo información como RSSI, RSRP, RSRQ, SNR, frecuencia y potencia. Estos datos serán registrados y representados en gráficos espectrales para su comparación entre los diferentes sectores geográficos.

Desde la perspectiva cualitativa, la investigación se orienta a la interpretación técnica de los datos obtenidos, considerando aspectos como la ubicación geográfica de las radiobases, las barreras físicas (edificios y montañas), las posibles zonas de interferencia y las condiciones

ambientales. Este análisis permitirá interpretar las variaciones del espectro en cada una de las zonas estudiadas dentro del cantón Santa Elena.

1.8.2 Diseño experimental y tecnológico

Diseño experimental: Este apartado implica la organización de una serie de mediciones en campo en donde las variables espectrales se recogen bajo condiciones específicas en tiempo real, en diferentes zonas específicas del cantón Santa Elena para observar las variaciones de las señales de la red móvil 4G. Se evalúan criterios como tiempo, lugar, obstáculos físicos y uso de bandas, permitiendo comparar resultados bajo diferentes escenarios.

Diseño tecnológico: Esta dimensión abarca las aplicaciones y herramientas empleadas para el desarrollo e implementación de un sistema portátil de monitoreo espectral, entre ellas la radio definida por software (SDR), GNU Radio y G-NetTrack Lite. El dispositivo tecnológico incluye tanto el sistema de adquisición (HackRF One + el software), lo que permite crear una plataforma funcional para el monitoreo y análisis del espectro, con posibilidades de ser replicada o escalada en futuras investigaciones o implementaciones.

1.8.3 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, ya que utiliza conocimientos teóricos sobre telecomunicaciones, procesamiento de señales y análisis espectral para desarrollar una metodología orientada al monitoreo y análisis del comportamiento espectral de la red móvil 4G LTE. Esta metodología se aplica a la evaluación del desempeño de la red 4G LTE en la provincia de Santa Elena. Adicionalmente, la investigación incorpora componentes descriptivos y comparativos, debido a que se describen y comparan las condiciones espectrales de los cuatro entornos geográficos seleccionados.

1.8.4 Aplicaciones y herramientas

El desarrollo experimental comprende las aplicaciones y las herramientas que se muestran a continuación en la tabla 1, en la que se describen los instrumentos tecnológicos empleados para el monitoreo espectral.

Tabla 1: Descripción y utilidad de las herramientas a utilizar en el presente trabajo.

Herramienta	Descripción	Utilidad
SDR HackRF One	Dispositivo que permite la captura de señales en un rango de 1 MHz a 6 GHz. Su portabilidad y compatibilidad con software libre lo hacen ideal para tareas de análisis espectral en campo. - Ancho de banda instantáneo de hasta 20 MHz; - Conversión A/D de 8 bits; - Conexión mediante USB.	Dispositivo indispensable para la toma de muestras de señales en la banda AWS de la red móvil 4G LTE.
Antena telescópica de banda ancha	Dispositivo que permite la recepción y transmisión de señales en un amplio rango de frecuencia de forma omnidireccional, sin necesidad de ajustes mecánicos.	Antena acoplada al SDR para captar señales en la banda AWS.
Laptop con GNU Radio	Para una correcta ejecución de GNU Radio se requieren los siguientes equipos utilizados para ejecutar GNU Radio. Se recomienda mínimo: SO Linux, Ubuntu o Windows; procesador Intel Core i7 o equivalente; mínimo 4 GB de RAM; mínimo 4 GB de almacenamiento.	Equipada con software de análisis y procesamiento de señales.
GNU Radio	Entorno de desarrollo gráfico que permite crear flujos de procesamiento de señales como FFT, filtros y espectrogramas.	Herramienta de software principal para la captura y análisis de señales.
G-NetTrack Lite	Aplicación móvil utilizada para la obtención de parámetros de cobertura	Permite obtener parámetros de red como

	y calidad de señal de la red LTE en las zonas de estudio.	RSSI, RSRP y cobertura en los sectores de estudio.
--	---	--

Nota. Elaboración propia.

El software que se utilizará, GNU Radio, es de código abierto y permite programar mediante Python o mediante una interfaz basada en diagramas de bloques. En este caso, se utilizará la segunda opción haciendo uso de bloques tales como: High Pass Filter (filtro pasa alto), Low Pass Filter (filtro pasa bajos), Band Pass Filter (filtro pasa banda), Band Reject Filter (filtro rechaza banda).

1.8.5 Población y muestra

La población del estudio está integrada por las emisiones de las redes móviles que operan en las bandas AWS presentes en las zonas específicas de estudio. La muestra corresponde a las mediciones espectrales realizadas en cuatro sectores geográficos seleccionados estratégicamente de acuerdo con sus características: urbano, rural, costero y montañoso.

1.8.6 Procedimiento

El desarrollo experimental se lleva a cabo en las siguientes fases:

a) Obtención de parámetros de red: Se realizan mediciones preliminares mediante G-NetTrack Lite para registrar parámetros de cobertura y calidad de señal de la red 4G LTE en los sectores seleccionados.

b) Verificación y configuración funcional del sistema SDR: Antes de iniciar las actividades de medición se verificó la correcta configuración de la frecuencia de operación o frecuencia central, la ganancia, el ancho de banda y la tasa de muestreo y el funcionamiento general del sistema del SDR HackRF One y GNU Radio. Este procedimiento tuvo como finalidad asegurar la estabilidad del sistema durante la adquisición de datos; por lo tanto, los valores hallados corresponden a estimaciones relativas, dependientes de la configuración del receptor, la antena y las condiciones de estimación de cada entorno. Se aclara que no existe ningún tipo de calibración aplicado al dispositivo SDR HackRF One. Para mejorar la precisión del oscilador se utilizan osciladores de alta precisión como el TCXO (oscilador de cristal compensado por

temperatura), referencias de reloj GPS (GPSDO) y herramientas de software de medición como Kalibrate-hackrf.

c) Configuración del SDR HackRF One y del software GNU Radio, verificando que el sistema se encuentre correctamente configurado antes de iniciar las mediciones en las frecuencias correspondientes.

d) Despliegue en campo: Se recorren los sectores seleccionados transportando el sistema SDR, realizando mediciones estacionarias y móviles.

e) Captura de datos espectrales: Se realiza un escaneo detallado del espectro, registrando señales, potencia, ruido, interferencias y pérdida espectral.

f) Registro georreferenciado: Se sincronizan los datos espectrales con las ubicaciones GPS.

g) Almacenamiento y respaldo de datos: Se almacenan en formatos .bin, .csv, .log y .png para su posterior análisis.

h) Análisis preliminar en campo: Se identifican posibles puntos críticos con pérdida de cobertura o interferencia.

i) Procesamiento en laboratorio: Se analizan los datos mediante GNU Radio y Google Earth Pro para obtener espectrogramas, gráficas de intensidad, mapas de cobertura y comparativas entre sectores.

j) Se comparan de manera referencial los valores estimados mediante GNU Radio con los parámetros reportados por G-NetTrack Lite, con el fin de analizar tendencias de comportamiento entre ambas plataformas.

k) La antena utilizada fue una ANT500 original de Great Scott Gadgets. Al referirse a una antena de banda ancha, el fabricante no especifica una ganancia fija en dBi, ya que esta se modifica con la frecuencia de operación. Por esa razón no se asumió un valor constante en la metodología y los resultados se muestran como estimaciones relativas del comportamiento de la señal.

1.8.7 Técnicas de análisis de datos

El análisis de los datos obtenidos se realiza mediante:

- Análisis espectral en GNU Radio: uso de la transformada rápida de Fourier (FFT), espectrogramas dinámicos y análisis de envolventes para evaluar la distribución de potencia en las bandas monitoreadas.
- Análisis comparativo en las zonas de estudio: evaluación de comportamiento del espectro en entornos urbanos y rurales, identificando diferencias de potencia, zonas de sombra o áreas de sobrecarga espectral.
- Análisis de interferencias y condiciones de propagación: análisis de superposición de señales, presencia de ruido y pérdidas por obstáculos geográficos o deficiencias en la infraestructura de red.

Anexo A: instalación y configuración del entorno de desarrollo

Anexo A: instalación y configuración del entorno de desarrollo

CAPÍTULO II: MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se muestran los fundamentos teóricos que sustentan el desarrollo de la investigación. Se abordan conceptos relacionados con el espectro electromagnético, la tecnología de radio definida por software (SDR), el estándar LTE, la banda AWS y las herramientas empleadas en el sistema de monitoreo espectral, como HackRF One, GNU Radio y G-NetTrack Lite. Estos conceptos constituyen la base para el diseño, implementación y análisis del sistema propuesto (Great Scott Gadgets, 2013; GNU Radio Project, 2024).

2.1 Fundamentos del espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es la parte del espectro electromagnético utilizada para la propagación de ondas de radio, lo que permite la transmisión y recepción de información sin utilizar un medio físico. Este recurso es esencial para servicios como la radiodifusión, la televisión, las comunicaciones móviles, los sistemas satelitales, el radar y las redes inalámbricas. Además, es un recurso natural limitado cuya administración y regulación incumbe a los organismos de cada país, siguiendo las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ARCOTEL, 2024).

De acuerdo con el reglamento de radiocomunicaciones de la UIT, las ondas radioeléctricas comprenden convencionalmente frecuencias inferiores a 3000 GHz, las cuales se irradian por el espacio sin guía artificial. La apropiada gestión del espectro radioeléctrico permite evitar interferencias entre los diferentes servicios y garantizar un uso eficiente de este recurso (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2024).

2.2 Procesamiento digital de señales en GNU Radio

El procesamiento digital de señales (digital signal processing, DSP) es una disciplina de las telecomunicaciones que permite modificar, analizar y extraer información de señales digitalizadas mediante algoritmos usados por software. En los sistemas de radio definida por software (SDR), funciones como el filtrado, la modulación y el análisis espectral se ejecutan mediante técnicas de procesamiento digital, lo que proporciona mayor flexibilidad y capacidad de reconfiguración del sistema (Oppenheim & Schaffer, 2010).

GNU Radio es una plataforma de software libre para el desarrollo de aplicaciones SDR que compone bloques de procesamiento digital para operaciones como filtrado, Transformadas rápidas de Fourier (FFT), demodulación y visualización espectral en tiempo real, proporcionando el análisis de señales de radiofrecuencia (GNU Radio Project, 2024).

En esta investigación, el DSP se utiliza para procesar las señales capturadas por el HackRF One, mejorando su representación espectral y accediendo al análisis de la red 4G LTE en la banda AWS.

2.2.1 Filtros digitales

Los filtros digitales son algoritmos matemáticos usados para modificar el contenido frecuencial de una señal mediante la atenuación o el paso selectivo de determinados componentes espectrales. En sistemas SDR, estos filtros desempeñan un papel fundamental al reducir el ruido, eliminar interferencias y mejorar la calidad de las señales antes de su procesamiento y análisis (Oppenheim & Schaffer, 2010).

2.2.1.1 Filtro pasa bajos (low pass filter)

En este sistema el filtro pasa bajos configurado en GNU Radio cumple la función de permitir el paso de las componentes de baja frecuencia mientras atenúa las frecuencias altas a una frecuencia de corte previamente definida. Este tipo de filtro es ampliamente utilizado para reducir ruido de alta frecuencia y restringir el ancho de banda de la señal analizada (Lyons, 2011).

2.2.1.2 Filtro pasa altos (high pass filter)

El filtro pasa altos permite el paso de las frecuencias superiores a la frecuencia de corte y atenúa las componentes de baja frecuencia. Su aplicación resulta útil para descartar componentes de baja frecuencia no deseadas y optimizar el procesamiento de las señales de interés. (Oppenheim & Schaffer, 2010).

2.2.1.3 Filtro pasa banda (band pass filter)

El filtro pasa banda permite únicamente el paso de las frecuencias comprendidas dentro de un intervalo específico, rechazando las componentes ubicadas por debajo y por encima de dicho rango. En aplicaciones SDR resulta principalmente útil para aislar una banda de frecuencia

determinada, como la banda AWS utilizada en la presente investigación (GNU Radio Project, 2024).

2.2.1.4 Filtro rechaza banda (band reject filter o notch filter)

El filtro rechaza banda atenúa un intervalo específico de frecuencias mientras permite el paso del resto del espectro. Este filtro se usa especialmente para excluir interferencias localizadas o señales no deseadas que afectan la calidad del análisis espectral (Lyons, 2011).

2.3 Tecnología: Software-Defined Radio (SDR)

La radio definida por software (SDR) es un sistema en el que las etapas que comúnmente se implementan mediante circuitos dedicados, como el filtrado, la modulación y la demodulación, se trasladan al dominio del software. De este modo, un mismo equipo de radiofrecuencia puede reconfigurarse para operar con diferentes estándares y bandas sin necesidad de modificar el hardware (Mitola, 1995). Esto se logra digitalizando las señales de radiofrecuencia a través de un conversor analógico-digital (ADC) y procesándolas posteriormente mediante algoritmos programables. Esto proporciona gran flexibilidad y capacidad de actualización (INCIBE, 2021).

Figura 2: Conjunto de radio definida por software (SDR) y antena ANT500

HackRF One de Great Scott Gadgets.



Nota. Elaboración propia.

2.3.1 Ventajas del SDR

Flexibilidad: Permite modificar protocolos y parámetros de funcionamiento mediante software, sin necesidad de realizar cambios en el hardware.

Bajo costo: Reduce la necesidad de utilizar equipos especializados, disminuyendo los costos de implementación y experimentación.

Reconfiguración: Permite cambiar de forma sencilla la frecuencia de operación y otros parámetros según los requerimientos de la aplicación.

Aplicación en investigación: Es una herramienta adecuada para el desarrollo de pruebas experimentales, análisis del espectro radioeléctrico y proyectos de investigación en telecomunicaciones (Ettus Research, 2022; GNU Radio Project, 2024).

Los SDR permiten realizar mediante software gran parte del procesamiento de las señales, utilizando procesadores de propósito general. Esta arquitectura incorpora funciones de transmisión (TX) y recepción (RX), como la modulación, la demodulación, el procesamiento en banda base y el filtrado de la señal, implementadas mediante software. Tal es así que los requerimientos de procesadores actuales, es posible ejecutar las funciones sin saturación. En la figura 3 se observa un diagrama de bloques que representa un sistema de comunicación en el que no se satura el procesador (Mitola, 1995); (Vega, A., 2020).

Figura 3: SDR ideal



Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, los SDR prácticos están diseñados considerando las restricciones existentes en los componentes físicos actuales, está definida como una radio multibanda que posee la capacidad de tolerar múltiples interfaces aire y protocolos con el uso de una mezcla de circuitos apropiada, procesadores de señales, microcontroladores y arreglos de compuertas (Vega, A., 2020).

En la figura 4 se presenta un diagrama de bloques que representa al SDR práctico, hay tantos bloques clasificados como bloques requeridos y bloques opcionales.

Figura 4: SDR práctico



Nota. Elaboración propia.

2.4 Antena telescópica portátil ANT500

La ANT500 es una antena telescópica portátil de banda ancha diseñada para aplicaciones de radio definida por software (SDR). Opera en un rango aproximado de 75 MHz a 1 GHz, presenta una impedancia nominal de 50 Ω y dispone de un conector SMA macho, lo que la hace compatible con dispositivos como el HackRF One. Su longitud se ajusta entre 20 cm y 88 cm, permitiendo adaptar parcialmente sus características de recepción a diferentes bandas de frecuencia. Además, incorpora una articulación giratoria que facilita la orientación de la antena durante las mediciones, mejorando la captación de señales de radiofrecuencia en aplicaciones de monitoreo y experimentación (Great Scott Gadget, 2025).

Figura 5: ANT500 - la antena telescópica para HackRF One o Yard Stick One

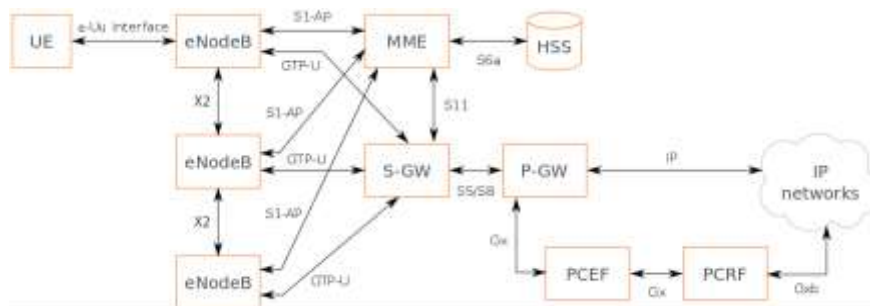


Nota. Elaboración propia a partir de (Great Scott Gadget, 2025).

2.5 Estándar LTE (4G)

El estándar de evolución a largo plazo (LTE, Long Term Evolution) constituye la evolución de las redes móviles GSM/EDGE y UMTS/HSPA hacia una arquitectura más simple y una interfaz de radio distinta, orientada a incrementar tanto la velocidad de transmisión de datos como la capacidad de la red.

Figura 6: Arquitectura LTE: estructura, componentes y funciones clave



Nota. Elaboración propia, investigado de (Logo, 2024).

2.5.1 Características y beneficios clave de la tecnología LTE

La tecnología LTE representa un gran avance con respecto a los estándares 3G y UMTS anteriores, con velocidades máximas de 300 Mbps de descarga y 75 Mbps de carga, en comparación con las velocidades máximas habituales del 3G de 40 Mbps de descarga y 20 Mbps de carga. LTE también mejoró la latencia de las conexiones 3G, reduciendo los tiempos de respuesta promedio de 200 ms a 10 ms.

LTE presenta mejoras clave sobre 3G gracias a su uso más eficiente del espectro radioeléctrico, utilizando bandas de frecuencia más amplias y combinación de canales de datos más anchos, lo que permite mayor capacidad y velocidad.

Incorpora una arquitectura de red totalmente IP, eliminando la separación entre voz y datos. Esto reduce la complejidad, disminuye los costos operativos, mejora la escalabilidad y permite una integración más efectiva con otras redes IP (Logo, 2024).

2.5.2 La arquitectura LTE

E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network): Compuesta por estaciones base llamadas eNodeB, que manejan directamente la comunicación con los dispositivos móviles.

EPC (Evolved Packet Core): El Núcleo de paquetes evolucionados (EPC) es el corazón de la red LTE y se encarga de funciones clave como la gestión de movilidad, autenticación, calidad de servicio, enrutamiento y asignación de direcciones IP.

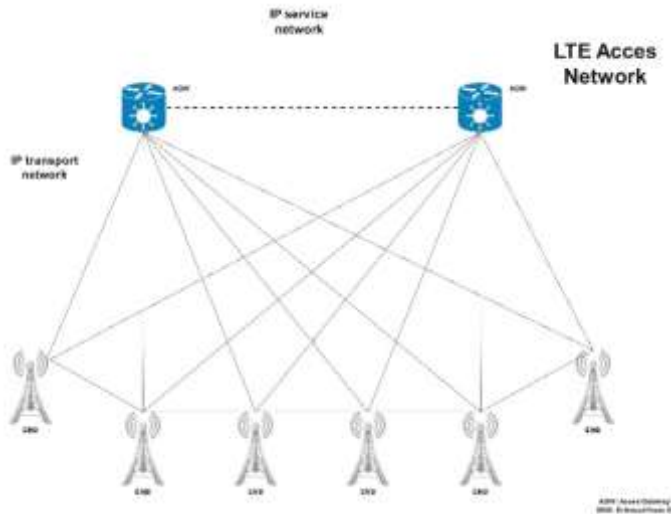
MME (Mobility Management Entity): Es un componente clave del EPC que gestiona la señalización NAS entre el usuario (UE), el eNodeB y el núcleo de la red. Se encarga de la autenticación del usuario mediante conexión al HSS, la gestión de movilidad, actualización de ubicación, y establecimiento de portadoras.

SGW (Serving Gateway): Actúa como punto de anclaje para la transferencia entre eNodeB vecinos y enruta todos los paquetes de datos del usuario. El S-GW también gestiona la movilidad entre LTE y otras redes CS.

PGW (Packet Data Network Gateway): La P-GW actúa como el punto de entrada y salida del tráfico de datos del UE hacia redes externas, garantizando su conectividad con diversas redes de paquetes (PDN). Un usuario puede conectarse simultáneamente a varias P-GW. Sus funciones incluyen la gestión de políticas, filtrado de paquetes, tarificación, interceptación legal, y cribado.

HSS (Home Subscriber Server): El servidor de suscriptor local (HSS) es una base de datos central que contiene información sobre usuarios y suscripciones. Sus funciones incluyen la gestión de la movilidad, el establecimiento de llamadas y sesiones, la autenticación de usuarios y la autorización de acceso.

Figura 7: Arquitectura de red de acceso LTE.



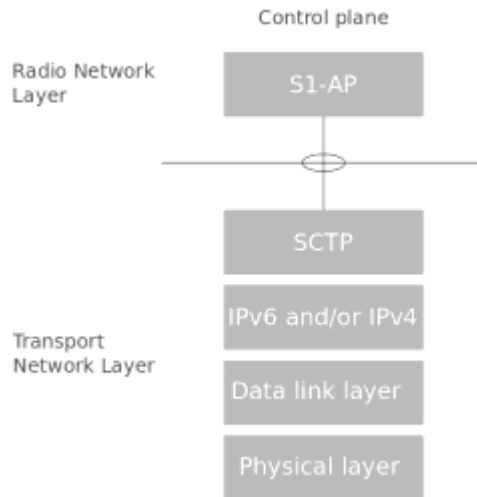
Nota. Elaboración propia, investigado de (Logo, 2024).

2.5.3 Interfaces

Interfaz S1: Conecta el eNodeB con el EPC (MME y S-GW), mediante los planos de control S1-AP y de usuario S1-U, permitiendo el intercambio de tráfico de datos y señalización.

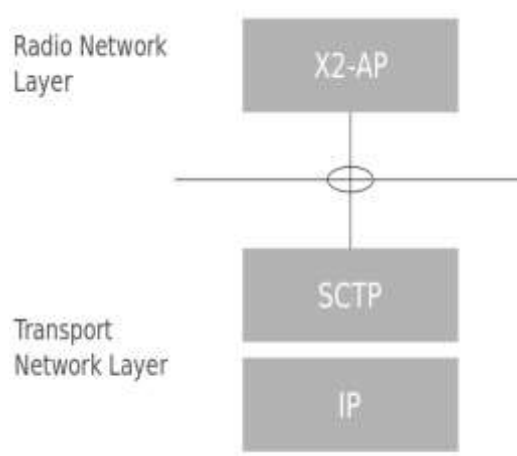
Interfaz X2: Conecta directamente dos o más eNodeB, facilitando la comunicación entre ellos y permitiendo traspaso de usuarios (hand over), la coordinación entre gestión de interferencia y celdas.

Figura 8: Diagrama de la pila de protocolos del plano de control en la interfaz S1.



Nota. Elaboración propia, investigado de (BTS, 2024).

Figura 9: Diagrama de la pila de protocolos del plano de control en la interfaz X2-C.



Nota. Elaboración propia, investigado de (BTS, 2024).

2.5.4 Características técnicas de LTE

- **Arquitectura totalmente IP:** LTE es una red completamente basada en IP. Para la prestación de servicios de voz utiliza VoLTE (Voice over LTE) o mecanismos alternativos como CSFB (Circuit Switched Fallback) en redes mixtas.
- **Modulación y acceso**

- **OFDMA** para el enlace descendente: OFDM divide los datos en pequeñas subportadoras en frecuencias vecinas, a través de un solo canal. OFDM gestiona fenómenos como interferencias, ruido o trayectos múltiples con mucha mayor eficiencia que otros métodos de modulación.

- **SC-FDMA** para el enlace ascendente: SC-FDMA es también un esquema de acceso múltiple por división de frecuencia y suele representar una alternativa a OFDM. Su principal ventaja es una menor relación potencia pico-potencia media, lo que ha demostrado ser más eficiente en redes donde la potencia de transmisión es fundamental. (BTS, 2024).

2.6 Bandas de frecuencia de LTE

A continuación, algunas de las bandas más utilizadas (GNU Radio Project, 2024):

Tabla 2: Bandas LTE más utilizadas según el estándar 3GPP TS 36.101

Banda	Modo	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Ancho de banda (MHz)
4 (AWS)	FDD	1710–1755	2110–2155	5, 10, 15, 20
1	FDD	1920–1980	2110–2170	5, 10, 15, 20
3	FDD	1710–1785	1805–1880	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
7	FDD	2500–2570	2620–2690	5, 10, 15, 20
20	FDD	832–862	791–821	5, 10
38	TDD	2570–2620	2570–2620	5, 10, 15, 20

Nota. Elaboración propia, investigado de (GNU Radio Project, 2024).

Entre las bandas más usadas por la tecnología LTE, la Banda 4 (AWS) tiene especial importancia en la presente investigación, debido a que es la banda de frecuencia empleada para las

mediciones espectrales realizadas con el sistema SDR HackRF One. Dicha banda opera en modo FDD, utilizando el rango de 1710–1755 MHz para el enlace ascendente (Uplink) y 2110–2155 MHz para el enlace descendente (Downlink), siendo una de las bandas ampliamente utilizadas por los operadores móviles para la prestación de servicios 4G LTE (GNU Radio Project, 2024).

2.7 Herramientas de software para el monitoreo espectral

En esta sección se presentan las principales herramientas de software usadas para la captura, monitoreo y análisis de señales de radiofrecuencia durante el desarrollo de la investigación. Estas aplicaciones permiten obtener parámetros de cobertura de la red móvil y realizar el procesamiento digital de señales para su posterior análisis espectral (Ettus Research, 2022; Gyokov Solutions., 2017)

2.7.1 G-NetTrack Lite

Es posible acceder a esta aplicación en la tienda de Google Play mediante el siguiente enlace: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.gyokovsolutions.gnettracklite>

Según Gyokov, además de su versión gratuita, la aplicación dispone de una versión Pro nombrada “G-NetTrack Pro”, que permite realizar monitoreo en tiempo real y pruebas de recorrido de tecnologías 2G, 3G, 4G y 5G. Esta herramienta consiste en registrar información de las redes móviles durante las mediciones, sin necesidad de utilizar equipos especializados de alto costo, por lo que establece una alternativa de bajo costo para actividades de monitoreo y análisis de redes móviles (Gyokov Solutions, 2017).

Figura 10: Registro de parámetros LTE con G-NetTrack Lite: monitoreo de señal y calidad en tiempo real

G-NetTrack Lite v19.1

Operator: CNT

MNC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 Tipo: LTE
eNB: 51689 CID: 3 PCI: 58 TA: 0
ARFCN: 2050 BAND: L4 BW: 20
F DL: 2120.0 MHz F UL: 1720.0 MHz
RSRP: -84 RSRQ: -10 SINR: 20.0 CQI: - RSSI: -53

Longitud: -80.85521 Latitud: -2.288614
Velocidad: 0 km/h Dirección: 30° NE GPS Exactitud: 3m
Alto: 36m Altitud: 36m Nivel del suelo: 0m

CARGA: 1 kbps DESCARGA: 1 kbps

Datos: CNT-LTE DATA

Hora de publicación: 39s

TIME	EVENTO	AC	CELLID	RSRP	RSRQ	SINR	CALIDAD	TYPE	SINR
18:00:18		00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:19	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:20	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:21	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:22	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:23	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:24	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:25	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:26	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:27	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:28	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:29	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:30	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:31	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:32	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:33	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:34	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:35	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:36	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:37	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:38	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:39	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:40	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:41	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:42	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:43	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:44	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:45	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:46	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:47	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:48	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:49	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:50	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:51	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:52	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:53	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:54	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:55	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:56	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:57	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:00:58	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100
18:00:59	HO-4046	00000	00000-2	100	100	00	11	00	100
18:01:00	HO-4046	00000	00000-1	100	100	00	11	00	100

Nota. Elaboración propia.

La figura 10 muestra una toma de muestra de los datos obtenidos durante una medición en tiempo real, entre ellos la frecuencia de Uplink, la frecuencia de Downlink, el número del eNodeB, el tipo de red, entre otros parámetros (Gyokov Solutions, 2017).

Entre las características de G-NetTrack Pro se encontraron:

- Permite la medición de celdas vecinas y de servicios de 2G, 3G, 4G y 5G.
- Permite el registro de archivos de mediciones en formato texto y kml.
- Secuencia de prueba de datos (carga, ping y datos), secuencia de pruebas de voz, secuencia mixta de datos/voz.
- Control G-Net Wifi, control de Bluetooth en varios dispositivos.
- Descarga y carga multihilo.
- Soporte de doble SIM.
- Carga de planos de planta y carga de rutas predefinidas.

- Mediciones en interiores y exteriores (Gyokov Solutions, 2017).

Esta y otras características son las que permiten ver los beneficios que posee G-NetTrack Pro sobre G-NetTrack Lite. Sin embargo, se pueden observar diferencias entre las dos versiones de la aplicación en la tabla 3 que se muestra a continuación:

Tabla 3: Características de G-NetTrack Lite y G-NetTrack Pro.

Característica	G-NetTrack Pro	G-NetTrack Lite
Estimación de celdas de servicio.	Sí	Sí
Estimación de celdas vecinas.	Sí	Sí
Visualización de ruta en el mapa.	Sí	Sí
Prueba de rendimiento de datos.	Sí	Sí
Historial de cambios de celda de servicio.	Sí	Sí
Gráfico con niveles de celdas vecinas y de servicio.	Sí	Sí
Información de frecuencia ARFCN para celdas vecinas y de servicio.	Sí	Sí
Medidas interiores en plano.	Sí	Sí
Modo AUTO INDOOR para túneles y lugares con mala recepción GPS.	Sí	Sí
Soporte para doble SIM.	Sí	Sí

Anuncios de voz para eventos (traspasos, reelecciones, etc.)	Sí	Sí
Registrar mediciones en archivos de registro (formato texto y kml)	Sí	Solo nivel RX.
Importación y exportación de archivos móviles y visualización de sitios.	Sí	No
Visualización de líneas de celdas vecinas y de servicio en el mapa.	Sí	No
Prueba de secuencia de voz.	Sí	No
Prueba de secuencia de SMS.	Sí	No
Prueba de secuencia de datos (carga, descarga, ping)	Sí	No
Prueba de secuencia mixta (Datos/voz/SMS)	Sí	No
Control Bluetooth de múltiples teléfonos.	Sí	No
Escaneo de celdas.	Sí	No
Control G-NetTrack WiFi.	Sí	No
Carga y descarga multiproceso.	Sí	No
Cargando rutas predefinidas.	Sí	No
Control remoto por SMS de la aplicación.	Sí	No

Altitud medida por barómetro.	Sí	No
Número limitado de capas de celdas y colores de celda personalizados.	Sí	No
Enviar mediciones en línea a la base de datos de G-NetReport.	Sí	No

Nota. Elaboración propia.

La tabla 3 muestra las distintas funcionalidades entre las versiones Lite y Pro de G-NetTrack. Aunque la versión Pro incorpora herramientas adicionales para campañas profesionales de medición, la versión Lite ofrece las funcionalidades necesarias para obtener los parámetros de cobertura y calidad de la señal requeridos en esta investigación (Gyokov Solutions, 2017).

2.7.2 GNU Radio

GNU Radio es una plataforma de software libre capaz de proporcionar funciones de procesamiento de señales en tiempo real, ofrece interfaces gráficas, y ser compatible con lenguajes de programación como C++ y Python (Ettus Research, 2022).

GNU Radio es un entorno de desarrollo con licencia de tipo GPL el cual permite el procesamiento de señales mediante el diagrama de bloques de procesamiento de señales, su construcción y simulación de los sistemas de comunicaciones. La labor de los radios es funcionar a nivel de la radiofrecuencia deseada mientras que el manejo y procesamiento de la banda base de la señal es realizada mediante software (Jaimes Rico y Lazcano Salas, 2019).

La tabla 4 siguiente muestra una comparación entre G-NetTrack Lite y GNU Radio, herramientas utilizadas para el monitoreo y análisis de redes inalámbricas.

Tabla 4: Tabla técnica comparativa.

Característica	G-NetTrack Lite	GNU Radio
----------------	-----------------	-----------

Naturaleza	Aplicación móvil para monitoreo de redes celulares.	Plataforma de software libre para procesamiento digital de señales.
Compatibilidad	Android.	Windows y Linux.
Función principal	Obtención de parámetros de cobertura y calidad de la red móvil.	Captura, procesamiento y visualización de señales SDR.
Tecnologías soportadas	2G, 3G, 4G y 5G.	Compatible con múltiples dispositivos SDR para diversas tecnologías inalámbricas.
Capacidad de análisis	Registra parámetros como RSRP, RSRQ, RSSI y ubicación GPS.	Permite aplicar filtros, FFT, espectrogramas y procesamiento digital de señales en tiempo real.
Uso en esta investigación	Obtención de parámetros de cobertura de la red 4G LTE.	Captura y análisis espectral de la banda AWS mediante HackRF One.

Nota. Elaboración propia.

La tabla 4 evidencia que ambas herramientas cumplen funciones complementarias. G-NetTrack Lite se emplea para medir indicadores de la red 4G LTE como RSRP, RSRQ y RSSI, mientras que GNU Radio, junto con HackRF One, permite realizar el análisis espectral de las señales mediante técnicas de procesamiento digital.

2.8 Herramientas de hardware para el monitoreo espectral

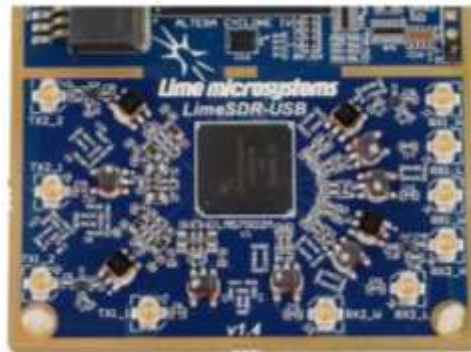
Una vez descritas las herramientas de software usadas para el procesamiento y análisis espectral de las señales LTE-4G es necesario contar con dispositivos capaces de recibir dichas señales, procesarlas y enviarlas o presentarlas de manera visual al usuario en tiempo real. Por ello, a continuación, se describen dispositivos que cumplen con este requisito para el monitoreo espectral de señales radioeléctricas (Lime Microsystems s.f.; HackRF., 2021).

2.8.1 LimeSDR

LimeSDR es una plataforma SDR de código abierto que trabaja como transceptor de radiofrecuencia con capacidad full dúplex y soporte MIMO. Opera entre 100 kHz y 3.8 GHz y es

compatible con aplicaciones de investigación, educación y desarrollo de sistemas y aplicaciones inalámbricas. Su relación con GNU Radio lo convierte en una opción para aplicaciones SDR; sin embargo, en esta investigación no fue seleccionado debido a su mayor costo en comparación con HackRF One (Lime Microsystems s.f.).

Figura 11: Placa LimeSDR



Nota. Elaboración propia, investigado de WiMo (s.f.).

Se puede apreciar el chip transceptor LMS7002M Myriad en el centro de la placa en la figura 11, el cual se encarga de la recepción y transmisión de las señales radioeléctricas. A continuación, se presenta una tabla de datos técnicos de LimeSDR.

Tabla 5: Datos técnicos de LimeSDR

Parámetro	Descripción
Nombre del producto	LimeSDR
Tipo de dispositivo	Transceptor SDR dúplex completo
Rango de frecuencia	De 100 kHz a 3,8 GHz
Potencia máxima de Tx	10 dBm (10 mW CW)
Ancho de banda	61,44 MHz
Resolución ADC/DAC	12 bits
Chip transceptor	LMS7002M Myriad HF
FPGA	Altera MAX10
Memoria	256 MB

Conector de antena	10 × U. FL (6 RX, 4 TX)
Alimentación	5 V
Compatibilidad	GNU Radio, Snappy Ubuntu Core App System
Aplicaciones	GSM, UMTS, LTE, 5G, WiFi, radares, SSB, DATV, satélites

Nota. Elaboración propia.

2.8.2 HackRF One

HackRF One es un dispositivo de radio definida por software (SDR) capaz de recibir y transmitir señales en un rango de frecuencias de 1 MHz a 6 GHz. Es una plataforma de hardware de código abierto que puede utilizarse como periférico USB o para funciones autónomas, según la programación establecida por el usuario. Está diseñado para facilitar el desarrollo y la experimentación con tecnologías de radio.

El dispositivo HackRF One posee características como:

- Es un transceptor semidúplex.
- Posee un rango de frecuencia de 1 MHz a 6 GHz.
- Las frecuencias de muestreo admitidas van desde 2 MS/s hasta 20 MS/s en cuadratura.
- Tiene una resolución de 8 bits.
- Posee fuente de alimentación por puerto USB.
- La alimentación del puerto de la antena es de 50 mA con 3,3V como máximo.
- Puerto SMA hembra para la antena (50 Ω).
- Es portátil.
- De código abierto.

También se dice que el dispositivo posee una potencia máxima de entrada de -5 dBm, es importante tener en cuenta este dato ya que si se llega a sobrepasar dicha potencia es posible provocar daños permanentes en el receptor. En aplicaciones con niveles de potencia superiores, se recomienda el uso de atenuadores externos para proteger el dispositivo.

Para seleccionar la plataforma SDR utilizada en este trabajo, se compararon técnicamente HackRF One y LimeSDR considerando su rango de frecuencia, ancho de banda, capacidad de procesamiento y costo. La tabla siguiente resume esta comparación y establece la selección del HackRF One.

Tabla 6: Tabla técnica comparativa HackRF One y LimeSDR

Característica	HackRF One	LimeSDR
Tipo de dispositivo	Transceptor SDR semidúplex	Transceptor SDR dúplex complete (Full Duplex)
Rango de frecuencia	1 MHz – 6 GHz	100 kHz – 3.8 GHz
Ancho de banda instantáneo	Hasta 20 MHz	Hasta 61.44 MHz
Resolución ADC/DAC	8 bits	12 bits
MIMO	No	Sí (2×2 MIMO)
Compatibilidad con GNU Radio	Sí	Sí
Conexión al computador	USB 2.0	USB 3.0
Costo aproximado	Bajo	Medio–Alto
Uso en esta investigación	Sí	No (referencia comparativa)

Nota. Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 6, ambos dispositivos son idóneos para aplicaciones SDR; no obstante, el HackRF One fue escogido debido a su relación entre prestaciones y costo, además de cumplir con los requisitos necesarios para el monitoreo espectral de la red 4G LTE en la banda AWS.

2.9 Revisión sistemática y análisis comparativo

La presente sección organizó 19 artículos científicos y documentos técnicos seleccionados para esta revisión sistemática en cinco categorías temáticas coherentes, definidas a partir de los objetivos declarados, la metodología empleada y el tipo de contribución científica de cada trabajo. La clasificación adoptó los principios del protocolo PRISMA, adaptados al ámbito de la ingeniería de telecomunicaciones. Los criterios de inclusión contemplaron: (i) publicaciones en revistas y conferencias IEEE o equivalentes de alto impacto; (ii) relación temática directa con el monitoreo espectral de redes 4G LTE en banda AWS mediante tecnología SDR; y (iii) período de publicación comprendido entre 1999 y 2024. Cada artículo se presenta con los elementos esenciales que permiten su evaluación crítica: objetivo, metodología, resultados, limitaciones, análisis comparativo y referencia bibliográfica completa en formato IEEE.

Las cinco categorías resultantes son: (A) plataformas SDR y hardware de monitoreo espectral; (B) software, herramientas y marcos de procesamiento para LTE con SDR; (C) técnicas de detección y medición espectral; (D) inteligencia artificial y aprendizaje automático aplicado al espectro; (E) estándares técnicos, normativa y marcos regulatorios.

Esta organización permite al lector comprender el estado del arte en sus dimensiones tecnológica, metodológica y normativa, y provee el apoyo necesario para demostrar el diseño del sistema de monitoreo propuesto y los vacíos que la presente tesis busca cubrir.

2.9.1 Categoría A: plataformas SDR y hardware de monitoreo espectral

Esta categoría reúne investigaciones enfocadas en el desarrollo, implementación y valoración de plataformas de radio definida por software (SDR) disponibles para el monitoreo espectral en tiempo real. Los estudios analizan el desempeño de diferentes dispositivos SDR, como USRP, LimeSDR, HackRF One y ADALM-Pluto, fundamentando aspectos como ancho de banda, sensibilidad, costo y capacidad de procesamiento. Estos antecedentes proporcionan criterios técnicos para la selección del hardware utilizado en la presente investigación.

Artículo A-01: Sensor SDR portátil para monitoreo de canales LTE con ADALM Pluto

Autor(es) y año: Sorecau, M., Sorecau, E., Sarbu, A., Helbet, R. y Bechet, P. (2022)

Objetivo del estudio: Implementar y evaluar un sensor SDR portátil de bajo costo basado en la plataforma ADALM Pluto para el monitoreo de señales LTE en múltiples bandas de frecuencia, incluyendo la banda AWS.

Metodología: **Hardware:** ADALM Pluto SDR (transceptor AD9363, ADC 12 bits, rango 325 MHz–3.8 GHz, BW 20 MHz). **Software:** GNU Radio. Estimación de PSD sobre señales LTE estimadas. Validación comparativa con analizador de espectro comercial de referencia en entornos urbanos.

Resultados principales: El sensor portátil mide la PSD de canales LTE activos con calidad útil para fines académicos y de investigación para señales de potencia moderada. El sistema adquiere el ancho de banda mínimo de 20 MHz requerido por LTE, demostrando la viabilidad técnica y económica de los sensores SDR de bajo costo para monitoreo de campo en la banda AWS.

Limitaciones: Estudio de un único prototipo de hardware sin verificación de largo plazo ni campaña de campo extensa. La comparación con el equipo de referencia se realizó en condiciones de laboratorio, sin considerar la variabilidad de canal en entornos urbanos complejos con propagación multipath.

Análisis: Constituye el antecedente empírico más directo de la presente investigación. La demostración de que el ADALM Pluto alcanza calidad comparable a equipos de referencia para señales LTE activas fundamenta la elección de plataformas SDR de bajo costo para el monitoreo en banda 4 AWS. (M. Sorecau, E. Sorecau, A. Sarbu, R. Helbet, and P. Bechet, 2022)

Artículo A-02: Sistema SDR de monitoreo espectral de banda ancha en tiempo real

Autor(es) y año: Helbet, R., Bechet, P., Sarbu, A., Miclaus, S.G., Sorecau, E. y Sorecau, M. (2021)

Objetivo del estudio: Presentar e implementar un sistema de monitoreo espectral de banda ancha en tiempo real basado en SDR capaz de detectar variaciones de ocupación en señales LTE de múltiples bandas simultáneamente con baja latencia.

Metodología: Hardware: USRP y LimeSDR. Software: GNU Radio con cadena de procesamiento FFT en tiempo real. Sistema de monitoreo continuo de banda ancha con visualización de espectrograma en tiempo real y registro de eventos de cambio espectral en bandas LTE.

Resultados principales: El sistema SDR detecta variaciones en la ocupación de canales LTE en múltiples bandas incluyendo segmentos de la banda AWS con baja latencia. El estudio valida el LimeSDR como una alternativa de menor costo al USRP para esta aplicación específica de monitoreo continuo.

Limitaciones: No incluye cuantificación explícita de la latencia de detección ni comparación sistemática con equipos de monitoreo comerciales certificados. La cobertura simultánea de múltiples bandas está limitada por el ancho de banda instantáneo del hardware SDR utilizado.

Análisis: Antecedente técnico directo de la arquitectura de monitoreo continuo en la banda AWS propuesta en la presente investigación. La validación del LimeSDR como alternativa de menor costo al USRP para monitoreo LTE en tiempo real amplía el espacio de opciones de hardware. (Helbet et al., 2021)

Artículo A-03: USRP B210: plataforma SDR de referencia para monitoreo LTE

Autor(es) y año: Ettus Research / National Instruments (2022)

Objetivo del estudio: Documentar las especificaciones técnicas del USRP B210 como plataforma SDR de referencia para aplicaciones de investigación, incluyendo el monitoreo LTE en la banda AWS.

Metodología: Hardware: USRP B210 (transceptor AD9361, ADC/DAC 12 bits, rango 70 MHz–6 GHz, BW hasta 56 MHz, MIMO 2×2 full-dúplex, USB 3.0). Software compatible: UHD, GNU Radio, srsRAN, Matlab. Documento de especificaciones técnicas con resultados de caracterización de rendimiento.

Resultados principales: El USRP B210 cubre completamente la banda AWS (1710–1755 MHz UL y 2110–2155 MHz DL) con BW máximo de 56 MHz, ADC de 12 bits y capacidad MIMO

2×2 full-dúplex. Su compatibilidad con GNU Radio y srsRAN lo convierte en la plataforma SDR de mayor versatilidad para investigación en monitoreo LTE a nivel universitario.

Limitaciones: El precio aproximado de USD 1,100–1,400 lo coloca fuera del alcance de proyectos con restricciones presupuestarias severas. Su consumo energético y requisitos de procesamiento del PC host son superiores a los de plataformas de menor costo como el ADALM Pluto.

Análisis: Establece el punto de referencia de alto desempeño con el que se comparan las plataformas SDR de menor costo evaluadas en la presente investigación. Su cobertura completa de banda 4 AWS con BW de 56 MHz y ADC de 12 bits representa el nivel óptimo de fidelidad para el monitoreo de señales LTE. (Ettus Research)

Artículo A-04: ADALM-PLUTO: módulo SDR de aprendizaje activo para monitoreo LTE

Autor(es) y año: Analog Devices (2018)

Objetivo del estudio: Documentar las características técnicas del módulo ADALM Pluto como plataforma SDR activa de aprendizaje orientada a aplicaciones educativas e investigación de bajo costo, incluyendo el monitoreo LTE en la banda AWS.

Metodología: Hardware: ADALM Pluto con transceptor AD9363 (ADC 12 bits, rango 325 MHz–3.8 GHz, BW 20 MHz, full-dúplex). Software compatible: GNU Radio, Matlab, Python, IIO. Documento de especificaciones técnicas con guías de aplicación para comunicaciones inalámbricas.

Resultados principales: El ADALM Pluto proporciona cobertura completa de la banda AWS con ADC de 12 bits y BW de 20 MHz, suficiente para capturar un canal LTE completo. Su precio aproximado de USD 150–200 lo convierte en la opción más equilibrada para investigación SDR en instituciones con restricciones de presupuesto, superando al HackRF One en sensibilidad.

Limitaciones: El BW máximo de 20 MHz limita la captura simultánea de múltiples canales LTE adyacentes o de señales LTE-Advanced con agregación de portadoras. La referencia de reloj interna puede introducir deriva de frecuencia en mediciones de largo plazo sin referencia externa.

Análisis: Las especificaciones del ADALM Pluto son la referencia técnica para una de las plataformas evaluadas en la presente investigación. Su ADC de 12 bits y cobertura completa de banda 4 AWS lo posicionan como la alternativa de bajo costo con mejor desempeño para el monitoreo de señales LTE activas. (Analog Devices, 2018)

Artículo A-05: HackRF One: especificaciones de la plataforma SDR de código abierto

Autor(es) y año: Great Scott Gadgets (2013)

Objetivo del estudio: Documentar las características técnicas del HackRF One como plataforma SDR de código abierto de amplio rango de frecuencias y bajo costo, aplicable al monitoreo espectral de la banda AWS.

Metodología: Hardware: HackRF One (ADC 8 bits, rango 1 MHz–6 GHz, BW 20 MHz, half-duplex, USB 2.0). Software compatible: GNU Radio, SDR#, GQRX, GNUHackRF. Especificaciones técnicas de hardware de código abierto con documentación de uso.

Resultados principales: El HackRF One cubre el rango de 1 MHz a 6 GHz con BW de 20 MHz, abarcando completamente la banda AWS tanto en UL (1710–1755 MHz) como en DL (2110–2155 MHz). Su precio de aproximadamente USD 300–350 y amplia compatibilidad con GNU Radio lo hacen accesible para investigación académica.

Limitaciones: El ADC de 8 bits limita la sensibilidad para señales de baja potencia, tal como demuestra (Helbet et al., 2021). Su modo half-dúplex impide la transmisión y recepción simultánea, y la interfaz USB 2.0 limita el BW de transferencia de datos en aplicaciones de alta tasa de muestreo.

Análisis: Referencia técnica para la plataforma de mayor cobertura de frecuencias y menor costo evaluada en la investigación. La comparación de sus limitaciones de ADC de 8 bits con las capacidades del ADALM Pluto (12 bits) y USRP (14 bits) es un eje central del análisis comparativo de hardware (Great Scott Gadgets, 2013).

Artículo A-06: SDR: desafíos técnicos y oportunidades para sistemas de comunicaciones

Autor(es) y año: Ulversoy, T. (2010)

Objetivo del estudio: Analizar de forma exhaustiva los desafíos técnicos y las oportunidades de la tecnología SDR para sistemas de comunicaciones inalámbricas, con énfasis en las limitaciones de hardware para el procesamiento de señales de banda ancha como LTE.

Metodología: Análisis teórico y revisión técnica de plataformas SDR de primera generación. Enfoque: análisis crítico de las restricciones de ADC, latencia de procesamiento, consumo energético y flexibilidad de las arquitecturas SDR disponibles. Sin implementación empírica con señales LTE específicas.

Resultados principales: Identifica la resolución del ADC y el ancho de banda instantáneo como los dos factores limitantes clave para el monitoreo de señales de banda ancha con hardware SDR genérico. Establece que la latencia de procesamiento en tiempo real es el principal cuello de botella para implementaciones software puras.

Limitaciones: Predominantemente teórico sin validaciones empíricas con hardware SDR específico para señales LTE. Las plataformas SDR analizadas corresponden a la primera generación (anterior a 2010), por lo que algunos hallazgos sobre limitaciones de hardware pueden no ser completamente aplicables a plataformas más recientes como el ADALM Pluto.

Análisis: Referencia teórica fundamental para evaluar las limitaciones del hardware SDR seleccionado. Su identificación de la resolución del ADC como factor limitante clave mantiene los hallazgos empíricos de (Helbet et al., 2021) y prueba la selección de plataformas con ADC de 12 bits o más para el monitoreo en banda AWS (Ulversø, 2010).

2.9.2 Categoría B: software, herramientas y marcos de procesamiento para LTE con SDR

Esta categoría comprende investigaciones relacionadas con el uso de herramientas de procesamiento digital de señales para el monitoreo y análisis espectral. Los trabajos describen el empleo de GNU Radio, Matlab y otras plataformas para implementar algoritmos de FFT, espectrogramas y técnicas de visualización en tiempo real. Estos estudios sostienen la metodología de procesamiento aplicada en esta investigación.

Artículo B-01: Medición de espectro usando GNU Radio y plataforma USRP

Autor(es) y año: Rashid, R., Aripin, N., Fisal, N. y Yusof, S. (2011)

Objetivo del estudio: Implementar y evaluar un sistema de detección del espectro basado en detección de energía en tiempo real sobre USRP y GNU Radio, evaluando su rendimiento en términos de probabilidad de detección y falsa alarma.

Metodología: Hardware: USRP. Software: GNU Radio con implementación de detector de energía (FFT de 1024 puntos). Implementación de sistema de sense espectral de radio cognitiva en tiempo real con evaluación de desempeño (P_d , P_{fa}) para distintos niveles de SNR.

Resultados principales: El sistema de detección por energía implementado en GNU Radio/USRP alcanza $P_d \geq 0.9$ para SNR hasta -8 dB, estableciendo un referente cuantitativo de rendimiento para sistemas de detección de señales LTE en la banda AWS con plataformas SDR de bajo costo.

Limitaciones: La evaluación se realiza en una sola banda de frecuencia (2.48 GHz) con BW de 4 MHz, no cubriendo el BW completo de canales LTE. El método de detección por energía es susceptible a incertidumbre de ruido (noise uncertainty), limitación teórica documentada por (Tandra, R., & Sahai, A., 2008).

Análisis: Establece el referente cuantitativo de rendimiento ($P_d \geq 0.9$ para $SNR \geq -8$ dB) para sistemas de detección espectral con GNU Radio/USRP que la presente investigación toma como umbral de referencia de desempeño. La implementación del detector de energía en GNU Radio es uno de los bloques fundamentales del sistema de monitoreo propuesto. (Rashid R. , N. Aripin, N. Fisal, and S. Yusof, 2011)

Artículo B-02: Análisis espectral y DSP en ingeniería con SDR y GNU Radio

Autor(es) y año: Bechet, P., Miclaus, S.G., Sarbu, A., Helbet, R., Sorecau, M. y Sorecau, E. (2023)

Objetivo del estudio: Documentar el marco metodológico para el análisis espectral y el procesamiento digital de señales en ingeniería utilizando plataformas SDR y el entorno GNU Radio, con énfasis en la configuración de bloques de estimación para señales LTE.

Metodología: Hardware: ADALM Pluto y USRP. Software: GNU Radio (bloques FFT, estimación de PSD, espectrograma, análisis armónico). Descripción detallada de la cadena de procesamiento GNU Radio para estimación de PSD, espectrograma y análisis frecuencial de señales LTE, con ejemplos de configuración para la banda AWS.

Resultados principales: El trabajo describe de forma detallada la configuración de bloques GNU Radio para la estimación de PSD y el análisis de espectrogramas de señales LTE, incluyendo parámetros de ventaneo, tamaño de FFT y promediado espectral. Los resultados son comparables a los de instrumentos de estimación especializados para señales LTE activas en la banda AWS.

Limitaciones: Tiene carácter predominantemente metodológico y tutorial, sin aportar resultados de investigación originales significativos. Los ejemplos se centran en el análisis pasivo sin decodificación del protocolo LTE.

Análisis: Referencia metodológica primaria para el diseño de la cadena de procesamiento GNU Radio implementada en el sistema de monitoreo de banda 4 AWS. Su descripción detallada de los parámetros de configuración de los bloques FFT y PSD orienta directamente la implementación del sistema propuesto. (Bechet, 2023)

2.9.3 Categoría C: técnicas de detección y medición espectral

Esta categoría agrupa investigaciones orientadas al análisis del comportamiento de redes LTE mediante indicadores de calidad de señal y ocupación del espectro. Los estudios evalúan parámetros como RSSI, RSRP, RSRQ y SNR en diferentes escenarios, proporcionando referencias para la interpretación de las mediciones realizadas en la presente investigación.

Artículo C-01: Límites SNR para detección de señales: el muro SNR

Autor(es) y año: Tandra, R. y Sahai, A. (2008)

Objetivo del estudio: Establecer el límite teórico fundamental de detección (muro SNR) de cualquier sistema de detección espectral en presencia de incertidumbre del modelo de ruido, analizando sus implicaciones para el diseño de sistemas de monitoreo con hardware SDR.

Metodología: análisis matemático formal del problema de detección binaria de hipótesis. Derivación del muro SNR como límite fundamental para cualquier detector espectral sin

conocimiento previo del canal. Análisis de la robustez de distintos detectores frente a incertidumbre de ruido.

Resultados principales: El muro SNR establece que ningún detector espectral puede identificar de forma confiable señales por debajo de un cierto nivel de SNR en presencia de incertidumbre del modelo de ruido, independientemente de la técnica de detección utilizada. Este límite se aplica directamente al monitoreo de señales LTE en la banda AWS con hardware SDR.

Limitaciones: Resultado teórico sin implementación empírica ni validación con hardware SDR específico para señales LTE. Las condiciones de incertidumbre de ruido asumidas pueden diferir de las del hardware SDR de bajo costo utilizado en aplicaciones prácticas de monitoreo.

Análisis: Establece el límite teórico inferior de detección esperado para el hardware SDR utilizado en la presente investigación. Su derivación del muro SNR es la referencia teórica para establecer las condiciones de operabilidad del sistema de monitoreo de banda 4 AWS y los escenarios de baja cobertura (Tandra, R., & Sahai, A., 2008).

Artículo C-02: Evaluación comparativa de sistemas SDR dedicados vs. smartphones para medición RSSI LTE

Autor(es) y año: Boussad, Y., Mahfoudi, M.N., Legout, A., Lizzi, L., Ferrero, F. y Dabbous, W. (2021)

Objetivo del estudio: Demostrar empíricamente que los sistemas SDR dedicados ofrecen mayor consistencia y repetibilidad que los smartphones para la medición de RSSI en redes LTE, justificando el uso de SDR para el monitoreo riguroso de la banda AWS.

Metodología: **Hardware:** Smartphones Android (múltiples modelos) vs. SDR dedicado con GNU Radio. **Software:** Aplicaciones Android de medición + GNU Radio. Comparación sistemática de mediciones de RSSI LTE entre smartphones y SDR dedicado, evaluando variabilidad interdispositivo y desempeño relativo en entornos de campo real.

Resultados principales: Los smartphones presentan variaciones significativas de RSSI entre dispositivos y condiciones de medición en redes LTE, atribuibles a diferencias de hardware

y firmware en el módulo RF. Los sistemas SDR dedicados ofrecen mayor comportamiento, precisión y repetibilidad para el monitoreo riguroso de señales LTE en la banda AWS.

Limitaciones: La comparación no incluye hardware USRP ni ADALM Pluto entre los sistemas SDR dedicados evaluados, limitando la generalización de los resultados a las plataformas de mayor desempeño. La evaluación se realizó con una única operadora comercial en una región geográfica específica.

Análisis: Ratifica el uso de plataformas SDR en lugar de smartphones para el monitoreo riguroso de señales LTE en la banda AWS. Este hallazgo justifica la elección del hardware SDR frente a soluciones basadas en smartphones para la presente investigación, donde la repetibilidad y fiabilidad de las mediciones son requisitos fundamentales. (Boussad et al., 2021)

Artículo C-03: Mediciones de ocupación espectral en Chicago y propuesta de estudios a largo plazo

Autor(es) y año: McHenry, M., Tenhula, P., McCloskey, D., Roberson, D. y Hood, C. (2006)

Objetivo del estudio: Documentar una de las primeras campañas extensas de medición de ocupación espectral en un entorno urbano, estableciendo la metodología de referencia para el diseño de campañas de medición SDR de campo en la banda AWS.

Metodología: Hardware: Analizador de espectro portátil (Van de medición dedicada). Software: Matlab (análisis estadístico). Campaña de medición de ocupación espectral de 100 MHz a 3 GHz en Chicago, incluyendo la banda AWS. Análisis de duty cycle, potencia media y estadísticas temporales.

Resultados principales: La campaña documenta la metodología pionera de medición de ocupación espectral urbana que sirve de referente para el diseño del sistema de monitoreo SDR de la banda AWS propuesto, incluyendo la selección de métricas, la duración de las mediciones y el análisis estadístico de los datos.

Limitaciones: El hardware de medición es un analizador de espectro de referencia de alto costo, sin uso de SDR de bajo costo. La campaña se realizó en 2006 con configuraciones de red

anteriores al despliegue de LTE, por lo que las estadísticas de ocupación no son directamente comparables con las actuales.

Análisis: Referente histórico fundamental para el diseño de las campañas de medición de ocupación espectral de la banda AWS. Su metodología de análisis estadístico del duty cycle es la base del procedimiento de medición empleado en la presente investigación (McHenry et al., 2006).

2.9.4 Categoría D: inteligencia artificial y aprendizaje automático aplicado al espectro

Esta categoría reúne normas técnicas, especificaciones e instrumentos regulatorios que forman los requisitos para el diseño, funcionamiento, interoperabilidad y valoración de las redes LTE y de las plataformas SDR. Incluye documentos expresados por organismos como 3GPP, ITU, FCC y GSMA, que facilitan el marco técnico y regulatorio para la configurar parámetros e interpretar las mediciones y el progreso del sistema de monitoreo espectral propuesto.

Artículo D-01: 3GPP TS 36.211: canales físicos y modulación del estándar LTE

Autor(es) y año: 3GPP (2022)

Objetivo del estudio: Especificar los canales físicos y la modulación del estándar LTE, incluyendo las señales de sincronización PSS y SSS, el canal PBCH y la estructura de trama, cuyos parámetros son fundamentales para implementar el receptor LTE del sistema de monitoreo SDR.

Metodología: N/A (norma técnica). Especificación normativa de los canales físicos LTE: PSS (Zadoff-Chu), SSS, PBCH, PDSCH, PDCCH, PUSCH, PUCCH, señales de referencia CRS. Estructura de trama LTE (10 ms / 1 ms subtramas / 0.5 ms slots / 7 símbolos OFDM). Parámetros OFDMA para banda 4 AWS.

Resultados principales: El estándar define con precisión la estructura de las señales PSS y SSS (usadas para detección y sincronización de celdas LTE en la banda AWS), los parámetros OFDM de la Band 4 (espaciado de subportadora 15 kHz, CP normal o extendido) y la estructura de trama completa que el receptor SDR debe conocer para decodificar correctamente las señales LTE activas.

Limitaciones: Documento normativo de alta densidad técnica; su interpretación requiere conocimiento previo del estándar LTE. La versión v17.3.0 cubre hasta release 17, por lo que incluye características de LTE-A que pueden no ser relevantes para el nivel de implementación del sistema SDR propuesto.

Análisis: Referencia normativa obligatoria para implementar el módulo de detección y sincronización de celdas LTE en la banda AWS. La especificación de la estructura de las señales PSS y SSS es indispensable para el diseño de los bloques GNU Radio de detección y decodificación del sistema propuesto. (3GPP, 2022)

Artículo D-02: 3GPP TS 36.213: procedimientos de la capa física LTE y definición normativa de RSRP, RSRQ y RSSI

Autor(es) y año: 3GPP (2022)

Objetivo del estudio: Definir los procedimientos de la capa física LTE, incluyendo las fórmulas exactas de cálculo de RSRP, RSRQ y RSSI y sus rangos de valores normalizados, siendo la referencia normativa obligatoria para interpretar las mediciones obtenidas con el sistema SDR de monitoreo.

Metodología: N/A (norma técnica). Especificación normativa de los procedimientos de medición LTE: RSRP (reference signal received power), RSRQ (reference signal received quality), RSSI (received signal strength indicator), sus definiciones matemáticas, rangos de valores (-140 a -44 dBm para RSRP) y procedimientos de reporte.

Resultados principales: El estándar define: RSRP como la potencia media de los elementos de recurso de referencia (RE) en la banda asignada, RSRQ como la relación $N \times \text{RSRP} / \text{RSSI}$ (donde N es el número de RBs medidos) y RSSI como la potencia total recibida incluyendo señal, interferencia y ruido. Estos son los parámetros que el sistema SDR de la presente investigación mide en la banda AWS.

Limitaciones: Las fórmulas de cálculo normativo requieren acceso al número exacto de bloques de recurso (RBs) de la celda medida, información que sólo es accesible mediante la

decodificación del PBCH con srsRAN o LTE-Cell-Scanner, añadiendo complejidad al sistema de monitoreo SDR de bajo costo.

Análisis: Referencia normativa obligatoria para diseñar el módulo de estimación de RSRP, RSRQ y RSSI del sistema de monitoreo de banda 4 AWS. Sin las definiciones de este estándar, las mediciones SDR no serían comparables con las de terminales comerciales ni con las especificaciones de calidad de servicio de las operadoras. (3GPP, 2022)

Artículo D-03: 3GPP TS 36.104: transmisión y recepción de la estación base LTE en la banda AWS

Autor(es) y año: 3GPP (2022)

Objetivo del estudio: Especificar los requisitos de transmisión y recepción de las estaciones base LTE (eNodeB), incluyendo los niveles de potencia de transmisión y sensibilidad del receptor para la banda AWS (Band 4), que son la referencia para calibrar el sistema SDR de monitoreo.

Metodología: N/A (norma técnica). Especificación normativa de los requisitos de RF del eNodeB LTE: potencia de transmisión máxima por banda, sensibilidad del receptor, rechazo de señales adyacentes, emisiones no deseadas. Parámetros específicos para banda 4 AWS (UL: 1710–1755 MHz, DL: 2110–2155 MHz).

Resultados principales: El estándar define los niveles de potencia de transmisión del eNodeB en banda 4 AWS (típicamente 20–46 dBm según la clase de celda) y los requisitos de sensibilidad del receptor (-101.5 dBm para BW de 5 MHz). Estos parámetros son la referencia para establecer los umbrales de detección del hardware SDR en el sistema de monitoreo propuesto.

Limitaciones: El estándar cubre únicamente los requisitos del eNodeB, no los del terminal móvil (UE). Los niveles de potencia de transmisión en despliegues reales pueden diferir de los máximos especificados según la configuración de la operadora, lo que introduce variabilidad en las condiciones de medición del sistema SDR.

Análisis: Provee los niveles de señal esperados en la banda AWS que el hardware SDR debe detectar. La calibración del sistema de monitoreo respecto a los niveles de potencia del

eNodeB y la sensibilidad mínima de detección requieren el marco normativo de este estándar. (3GPP, 2022). La metodología del estudio analizado es una referencia para futuras investigaciones que requieran instrumento de calibración; ya que dicho procedimiento no fue aplicado en esta investigación.

Artículo D-04: FCC: Servicios inalámbricos avanzados (AWS) — definición regulatoria de la banda objeto de estudio

Autor(es) y año: FCC (2022)

Objetivo del estudio: Definir los servicios inalámbricos Avanzados (AWS) como servicios inalámbricos que operan en el segmento de microondas entre 1695 y 2200 MHz, siendo la banda AWS-1 (Band 4 LTE) con UL en 1710–1755 MHz y DL en 2110–2155 MHz la principal banda de estudio.

Metodología: N/A (documento regulatorio). Definición de la banda AWS-1 (Band 4 LTE): UL 1710–1755 MHz, DL 2110–2155 MHz. Asignación de bloques de espectro a operadoras, potencias máximas de transmisión permitidas, y operadoras autorizadas en la región de interés.

Resultados principales: La FCC define formalmente la banda AWS-1 (Band 4 LTE) como el segmento de espectro con UL en 1710–1755 MHz y DL en 2110–2155 MHz, siendo utilizada por operadoras como AT&T, T-Mobile y operadoras latinoamericanas como Claro, Movistar y Cnt. El documento establece el marco legal del espectro objeto de monitoreo.

Limitaciones: El documento regulatorio de la FCC es específico para los Estados Unidos; las regulaciones para Ecuador y América Latina son emitidas por la (ARCOTEL, 2024) y la ARCOTEL-CITEL respectivamente. Sin embargo, la definición técnica de la Band 4 es universal, independientemente de la jurisdicción regulatoria.

Análisis: Establece el marco regulatorio de la banda AWS objeto de monitoreo en la presente investigación. La definición de los rangos de frecuencia UL y DL de Band 4 es la referencia para configurar el hardware SDR y el software de monitoreo en la banda correcta (Federal Communications Commission [FCC], 2022).

Artículo D-05: GSMA: Economía móvil en América latina y el Caribe 2023

Autor(es) y año: GSMA Intelligence (2023)

Objetivo del estudio: Reportar el estado y la proyección de la economía móvil en América latina y el Caribe, documentando que la banda AWS (Band 4) es una de las principales bandas de despliegue LTE en Ecuador, Colombia, Perú y Chile, y que la cobertura 4G LTE supera el 85% de la población en la región.

Metodología: N/A (informe de mercado). Análisis del mercado móvil de América latina y el Caribe: cobertura LTE por país, penetración de smartphone, tráfico de datos proyectado, bandas de frecuencia predominantes. Datos específicos para Ecuador respecto al uso de banda 4 AWS por operadoras locales.

Resultados principales: La cobertura 4G LTE supera el 85% de la población en América latina y el Caribe. La banda AWS (Band 4) es una de las principales bandas de despliegue LTE en Ecuador (Claro, Movistar, Cnt), Colombia, Perú y Chile. El tráfico de datos móviles en la región crecerá 5x entre 2023 y 2030, aumentando la demanda de monitoreo espectral eficiente.

Limitaciones: El informe es de carácter de mercado y no proporciona datos técnicos detallados sobre los parámetros de señal de las redes LTE en banda 4 AWS. Las estadísticas de cobertura son agregadas y no distinguen entre distintas operadoras ni entre entornos urbanos y rurales.

Análisis: Contextualiza regionalmente la relevancia del monitoreo espectral SDR de la banda AWS propuesto en la presente tesis. La documentación de que Band 4 es la banda LTE predominante en Ecuador establece directamente la justificación regional del objeto de estudio de la investigación. (GSMA Intelligence, 2023)

Artículo D-06: Manual de monitoreo del espectro de la ITU-R

Autor(es) y año: ITU-R (2011)

Objetivo del estudio: Establecer las directrices internacionales para la realización de mediciones del espectro radioeléctrico, incluyendo los requisitos de los sistemas de monitoreo, los procedimientos de calibración y los parámetros que deben medirse en las diferentes bandas de frecuencia.

Metodología: N/A (documento normativo). Manual de procedimientos de monitoreo espectral de la ITU: requisitos de sistemas de monitoreo, procedimientos de calibración, parámetros a medir (PSD, potencia de canal, ocupación), gestión de datos de medición y coordinación de actividades de monitoreo entre administraciones. La metodología del estudio citado muestra una referencia para nuevas investigaciones que dispongan de instrumentos de calibración: ya que dicho proceso no fue aplicado en la presente investigación.

Resultados principales: El manual ITU establece los requisitos mínimos que debe cumplir cualquier sistema de monitoreo espectral para ser reconocido como herramienta válida de gestión del espectro por las administraciones nacionales. Define los procedimientos de calibración y los parámetros a medir que deben guiar el diseño del sistema SDR propuesto.

Limitaciones: El manual está orientado a sistemas de monitoreo institucionales de alto costo; no incluye directrices específicas para sistemas SDR de bajo costo como los empleados en investigación universitaria. Las recomendaciones de rendimiento y configuración pueden estar fuera del alcance del hardware SDR evaluado.

Análisis: Referencia normativa internacional para verificar la metodología del sistema SDR de la presente investigación. Los parámetros de medición y los procedimientos de calibración definidos por la ITU orientan el diseño del sistema de monitoreo de banda 4 AWS para que sus resultados sean comparables con los de sistemas de monitoreo institucionales. (ITU-R, 2011)

2.9.5 Categoría E: estándares técnicos, normativa y marcos regulatorios

Esta categoría reúne investigaciones que emplean el monitoreo espectral como una herramienta para la supervisión, optimización y diagnóstico del comportamiento de redes inalámbricas. Los estudios analizan la capacidad de las plataformas SDR para identificar interferencias, evaluar la ocupación del espectro radioeléctrico y obtener información relevante sobre el desempeño de los sistemas de comunicación. Estos antecedentes permiten comprender la aplicación práctica del monitoreo espectral como apoyo para la gestión, planificación y toma de decisiones en redes de telecomunicaciones.

Artículo E-01: Evaluación de la precisión de smartphones para medición de RSSI LTE (perspectiva campaña)

Autor(es) y año: Boussad, Y. et al. (2021) — Perspectiva de campaña de medición comparativa

Objetivo del estudio: Documentar los resultados de una campaña de medición comparativa de RSSI LTE entre smartphones y sistemas SDR dedicados, estableciendo cuantitativamente las diferencias de precisión entre ambos enfoques en condiciones de campo real.

Metodología: Hardware: Smartphones Android (múltiples modelos) vs. SDR dedicado con GNU Radio. Software: Aplicaciones Android + GNU Radio. Campaña de medición de RSSI LTE en condiciones de campo real con una operadora comercial, comparando la variabilidad interdispositivo y el rendimiento relativo entre smartphones y SDR dedicado.

Resultados principales: La campaña documenta que la variabilidad interdispositivo de RSSI en smartphones puede superar los 10 dB en condiciones de campo real, mientras que los sistemas SDR dedicados presentan variabilidades inferiores a 2 dB en condiciones equivalentes. Esta diferencia afirma cuantitativamente el uso de SDR dedicado para monitoreo riguroso de la banda AWS.

Limitaciones: La campaña se realizó con una única operadora comercial en una región geográfica específica, limitando la generalización de los resultados. No incluye hardware USRP ni ADALM Pluto entre los sistemas SDR evaluados.

Análisis: Desde la perspectiva de campaña de medición, este trabajo establece el estándar de comparación entre el desempeño de los smartphones y los sistemas SDR dedicados para el monitoreo de señales LTE en la banda AWS, demostrando cuantitativamente la elección del hardware SDR en la presente investigación. (Boussad et al., 2021)

Artículo E-02: Instrumento SDR portátil de bajo costo para estudios de propagación RF (perspectiva campaña)

Autor(es) y año: Wright, D.P. y Ball, E.A. (2020) — Perspectiva de campaña de medición

Objetivo del estudio: Documentar la metodología y los resultados de campañas de propagación RF realizadas con hardware SDR de bajo costo, proveyendo un modelo de aprobación para campañas de medición de señales LTE en la banda AWS.

Metodología: Hardware: RTL-SDR con LNA externo. Software: GNU Radio + Python. Metodología de campaña de medición de propagación RF con hardware SDR de bajo costo, incluyendo calibración del sistema, procedimiento de medición y análisis estadístico de variabilidad de señal. La metodología del estudio citado constituye una referencia para futuras investigaciones que dispongan de instrumentos de calibración, ya que dicho procedimiento no fue aplicado en la presente investigación.

Resultados principales: Las campañas de propagación realizadas con el instrumento SDR de bajo costo producen resultados comparables a los de instrumentos de laboratorio para métricas de pérdida de trayectoria y variabilidad de RSSI. La metodología propuesta es replicable con distintas plataformas SDR de bajo costo para distintas bandas de frecuencia.

Limitaciones: Las limitaciones de BW del RTL-SDR (< 2.4 MHz) impiden la captura de canales LTE completos de 20 MHz en la banda AWS. Los resultados de la campaña son para bandas de frecuencia específicas del entorno de prueba, requiriendo adaptación para aplicaciones en banda 4 AWS.

Análisis: Desde la perspectiva de campaña de medición, este trabajo provee la metodología de calibración y validación de campo para sistemas SDR de bajo costo que la presente investigación adapta para el monitoreo de señales LTE en la banda AWS. Su demostración de repetibilidad con SDR de bajo costo evidencia el enfoque metodológico adoptado. (Wright ; Ball, 2020)

Artículo E-03: Sensor SDR portátil para monitoreo de canales LTE: análisis preliminar de campo

Autor(es) y año: Sorecau, M. et al. (2022) — Perspectiva de campaña de medición de campo

Objetivo del estudio: Documentar los primeros resultados de medición de campo con el sensor SDR portátil ADALM Pluto para señales LTE activas en la banda AWS en un entorno urbano real, estableciendo la metodología de referencia para campañas de monitoreo LTE con SDR de bajo costo.

Metodología: Hardware: ADALM Pluto SDR. Software: GNU Radio. Primera campaña de medición de campo con sensor SDR portátil ADALM Pluto para señales LTE activas en múltiples bandas incluyendo la AWS. Metodología de calibración, procedimiento de medición de PSD y comparación con analizador de referencia. La metodología del estudio citado establece una referencia para futuras indagaciones que dispongan de instrumentación de calibración; dicho procedimiento no fue aplicado en la actual investigación.

Resultados principales: Los primeros resultados de campo demuestran que el sensor SDR portátil ADALM Pluto produce mediciones de PSD comparables al analizador de referencia para señales LTE activas en la banda AWS en condiciones de campo urbano. La metodología de campaña propuesta es reproducible y adaptable a otros entornos urbanos.

Limitaciones: Artículo preliminar con número limitado de puntos de medición de campo. No incluye análisis estadístico extenso de la variabilidad de señal en la banda AWS. La comprobación se limita a la medición de PSD sin decodificación de los parámetros del protocolo LTE.

Análisis: Antecedente más directo de la metodología de campaña de medición de campo propuesta en la presente investigación. Su demostración de que el ADALM Pluto produce mediciones de PSD comparables a las del analizador de referencia en condiciones de campo real en la banda AWS afirma el enfoque metodológico adoptado. (Sorecau et al., 2022)

Artículo E-04: Monitoreo remoto basado en SDR: campaña de medición de espectrograma en tiempo real

Autor(es) y año: Sorecau, M. et al. (2023) — Perspectiva de campaña de medición remota

Objetivo del estudio: Documentar los resultados de campañas de medición remota de espectrograma en tiempo real para señales LTE activas en la banda AWS, utilizando un sistema SDR con control remoto vía web.

Metodología: Hardware: USRP-2932. Software: GNU Radio + Python + Bokeh. Campañas de medición remota de PSD y espectrograma en tiempo real para señales LTE en la

banda AWS, evaluando la calidad de las mediciones obtenidas con los métodos I/Q streaming y FFT streaming.

Resultados principales: Las campañas de medición remota con USRP-2932 producen espectrogramas de alta calidad para señales LTE activas en la banda AWS, con fidelidad comparable a la medición local. El método FFT streaming resulta más eficiente para campañas de larga duración con recursos de red limitados.

Limitaciones: Las campañas se realizaron en entorno de laboratorio con señales LTE de operadoras comerciales activas locales, sin incluir variabilidad de campo extensa. La calidad de los espectrogramas obtenidos depende de la calidad de la conexión de red entre el sensor y el servidor de visualización.

Análisis: Desde la perspectiva de campaña de medición, este trabajo indica que la arquitectura de monitoreo remoto con FFT streaming para la realización de campañas de medición de espectrograma en tiempo real de señales LTE en la banda AWS, siendo directamente adaptable al sistema propuesto en la presente investigación. (Sorecau et al., 2023)

La clasificación sistemática de los 19 artículos y documentos técnicos revisados reúne investigaciones que emplean el monitoreo espectral como herramienta para la supervisión, optimización y diagnóstico del comportamiento de redes inalámbricas. Los estudios analizan la capacidad de las plataformas SDR para identificar interferencias, evaluar la ocupación del espectro radioeléctrico y obtener información relevante sobre el desempeño de los sistemas de comunicación. En conjunto, estos antecedentes respaldan la aplicación del monitoreo espectral para la gestión, planificación y toma de decisiones en redes de telecomunicaciones. A continuación, se presenta una clasificación de los artículos científicos seleccionados de acuerdo con su temática principal.

Tabla 7: Síntesis de los estudios revisados sobre monitoreo espectral con tecnología SDR.

N.º	Autor (Año)	Objetivo del estudio	Plataforma / Herramienta	Variables o métricas	Principal aporte
1	Sorecau et al. (2022)	Implementar un sensor SDR portátil para monitoreo LTE.	ADALM Pluto + GNU Radio	PSD	Demuestra que un SDR de bajo costo puede obtener mediciones comparables a un analizador de espectro.
2	Helbet et al. (2021)	Desarrollar un sistema SDR de monitoreo espectral en tiempo real.	USRP, LimeSDR	Ocupación espectral, FFT	Asegura el monitoreo continuo de múltiples bandas LTE.
3	Ettus Research (2022)	Presentar las especificaciones del USRP B210.	USRP B210	BW, ADC, MIMO	Establece el hardware de referencia para investigación SDR.
4	Analog Devices (2018)	Documentar las características del ADALM Pluto.	ADALM Pluto	BW, sensibilidad	Evidencia su equilibrio entre costo y rendimiento para LTE.
5	Great Scott Gadgets (2013)	Describir las especificaciones del HackRF One.	HackRF One	Rango de frecuencia, ADC	Destaca su amplia cobertura de frecuencia y bajo costo.
6	Ulversøy (2010)	Analizar los desafíos y oportunidades del SDR.	SDR (teórico)	ADC, ancho de banda, latencia	Fundamenta las limitaciones técnicas del hardware SDR.

7	Rashid et al. (2011)	Implementar un sistema de detección espectral.	GNU Radio + USRP	FFT, SNR, Pd	Ratifica el uso de GNU Radio para detección espectral.
8	Bechet et al. (2023)	Describir el procesamiento digital con GNU Radio.	GNU Radio	PSD, FFT, espectrograma	Proporciona la metodología para el procesamiento espectral.
9	Tandra y Sahai (2008)	Establecer el límite teórico de detección (SNR Wall).	Modelo teórico	SNR	Fundamenta los límites de detección de señales débiles.
10	Boussad et al. (2021)	Comparar smartphones y SDR para medir RSSI.	Smartphones vs. SDR	RSSI	Demuestra desempeño y repetibilidad del SDR.
11	McHenry et al. (2006)	Realizar una campaña de ocupación espectral.	Analizador de espectro	Ocupación espectral	Referencia metodológica para campañas de medición.
12	3GPP TS 36.211 (2022)	Definir canales físicos y modulación LTE.	Norma 3GPP	PSS, SSS, OFDM	Base normativa para la detección y sincronización LTE.
13	3GPP TS 36.213 (2022)	Definir procedimientos de capa física LTE.	Norma 3GPP	RSRP, RSRQ, RSSI	Referencia para interpretar las mediciones LTE.
14	3GPP TS 36.104 (2022)	Especificar transmisión y recepción del eNodeB.	Norma 3GPP	Potencia, sensibilidad	Proporciona parámetros de calibración para SDR.
15	FCC (2022)	Definir la banda AWS y su regulación.	Documento regulatorio	Bandas UL/DL	Delimita el espectro utilizado en la investigación.
16	GSMA Intelligence (2023)	Analizar el despliegue LTE en América latina.	Informe técnico	Cobertura LTE	Justifica la importancia de la banda AWS en Ecuador.

17	ITU-R (2011)	Establecer procedimientos internacionales de monitoreo espectral.	Manual ITU	PSD, ocupación espectral	Fundamenta la metodología de monitoreo.
18	Wright y Ball (2020)	Ratifica campañas de propagación con SDR económico.	RTL-SDR	RSSI, pérdida de trayectoria	Demuestra la viabilidad del SDR de bajo costo en campañas de medición.
19	Sorecau et al. (2023)	Implementar monitoreo remoto de espectrogramas LTE.	USRP-2932 + GNU Radio	PSD, espectrograma	Verifica el monitoreo remoto en tiempo real mediante SDR.

Nota. Elaboración propia.

La tabla 7 presenta un resumen comparativo de 19 estudios revisados sobre el monitoreo espectral de redes 4G LTE mediante plataformas SDR. En ella se sintetizan las metodologías, las plataformas utilizadas, las métricas analizadas, las principales limitaciones y los aportes de cada investigación. En conjunto, los estudios evidencian la eficacia de las plataformas SDR para el monitoreo espectral, destacando el uso de USRP, ADALM Pluto, HackRF One y LimeSDR, así como de GNU Radio para el procesamiento de señales. Además, las normas 3GPP, las recomendaciones de la ITU-R y la normativa de la FCC proporcionan el marco técnico que mantiene la metodología empleada en la presente investigación.

CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO ESPECTRAL

3.1 Preparación técnica del sistema

Para el desarrollo del sistema de monitoreo espectral se utilizó el entorno GNU Radio como plataforma de procesamiento digital de señales y Python como lenguaje de programación empleado por dicho entorno. La elaboración del software incluyó la instalación y configuración de las dependencias necesarias para verificar la comunicación con el dispositivo SDR HackRF One. Debido a que estas instrucciones corresponden a tareas de configuración del entorno de desarrollo y no forman parte de la metodología experimental, el procedimiento detallado se presenta en el Anexo A.

3.2 Desarrollo del sistema en GNU Radio

Esta sección documenta en detalle la implementación de los diagramas de flujo de procesamiento espectral LTE desarrollados en GNU Radio Companion.

3.2.1 Configuración del sistema en GNU Radio para los escenarios de estimación

Debido a que las condiciones de propagación se modifican según el entorno geográfico, fue necesario ajustar determinados parámetros del sistema SDR para mejorar la adquisición de las señales LTE. Las configuraciones se establecieron considerando las características de propagación de cada entorno de medición, con base en recomendaciones técnicas de la ITU-R, especificaciones del estándar 3GPP y literatura especializada en radiofrecuencia y procesamiento digital de señales. En las siguientes tablas se presentan los parámetros usados para cada entorno.

Tabla 8: Principales variables del sistema GRC

Variable	Valor	Descripción
-----------------	--------------	--------------------

samp_rate	20M (20 Msps)	Tasa de muestreo del sistema. Determina el ancho de banda instantáneo que puede ser capturado durante el monitoreo espectral.
Frecuencia_central	2.132G (2.132 GHz)	Frecuencia de sintonía del receptor SDR, correspondiente al canal de enlace descendente (Downlink) de la banda AWS utilizada por la tecnología LTE.
Bandwidth	20M (20 MHz)	Ancho de banda configurado en el receptor HackRF One. Sincroniza el filtro analógico del dispositivo con la tasa de muestreo para minimizar el aliasing y garantizar una adecuada captura de la señal.

Nota. Elaboración propia.

Figura 12: Propiedades de la variable samp_rate.

The screenshot shows a window titled "Properties: Variable" with a close button (X). It has three tabs: "General", "Advanced", and "Documentation". The "General" tab is active. Inside, there are two input fields: "ID" containing the text "samp_rate" and "Value" containing the text "20e6".

Figura 13: Propiedades de la variable Frecuencia_central.

The screenshot shows a window titled "Properties: Variable" with a close button (X). It has three tabs: "General", "Advanced", and "Documentation". The "General" tab is active. Inside, there are two input fields: "ID" containing the text "Frecuencia_central" and "Value" containing the text "2.132e9".

Figura 14: Propiedades de la variable de ancho de banda (Bandwidth).

The image shows a software window titled "Properties: Variable" with a close button (X) in the top right corner. Below the title bar are three tabs: "General", "Advanced", and "Documentation". The "General" tab is currently selected and highlighted with a blue underline. Inside the "General" tab, there are two input fields. The first field is labeled "ID" and contains the text "Bandwidth". The second field is labeled "Value" and contains the text "20e6".

En la tabla 8 se muestran las principales variables con los datos que se deben tener para que el diagrama de bloques funcione acorde al tema, mientras que en las figuras 12, 13 y 14 se muestran las propiedades de dichas variables en el entorno de GNU Radio.

La frecuencia central se configuró en 2.132 GHz, valor situado aproximadamente en el centro del rango downlink de la banda AWS (2110–2155 MHz), determinado por el estándar 3GPP TS 36.104. Esta configuración permite captar adecuadamente las portadoras LTE presentes durante las mediciones espectrales.

La tasa de muestreo (samp_rate) se basa en el teorema de Nyquist - Shannon y en las especificaciones de canalización del 3GPP TS 36.101. Para evitar el fenómeno de aliasing, la frecuencia de muestreo debe ser suficiente para representar adecuadamente el ancho de banda de la señal ($f_s \geq B$). Al configurar la tasa de muestreo en 20 Msps se captura el canal de mayor capacidad comercial disponible en su totalidad sin perder resolución temporal.

Adicional, al tener que monitorear diferentes zonas es necesario que ciertos valores se deben ajustar a las necesidades de dichas zonas, estos valores se especifican a continuación:

Tabla 9: Variables para la zona montañosa

Variable	Valor	Descripción
RF Gain	14 dB	Un filtro pasa bajos no aumenta la cobertura. Su función es reducir interferencias y ruido fuera de banda (ITU-R, 2018).

IF Gain	40 dB	La ganancia IF amplifica la señal antes de la conversión digital, lo que permite mejorar el nivel de la señal respecto al ruido interno del receptor. En este escenario, se configuró en 40 dB para favorecer la recepción de señales en condiciones de relieve abrupto (Razavi, 2011).
BB Gain	De 30 dB a 40 dB	Se asegura que los bits del ADC representan la señal y las señales extremadamente débiles no sean opacadas por el ruido de fondo del chip (Proakis & Manolakis, 2007).
Low Pass Filter (Cutoff)	2.5 MHz	El filtro pasa bajos permite atenuar las componentes de frecuencia superiores a la frecuencia de corte establecida, reduciendo señales no deseadas y contribuyendo a mejorar la calidad de la señal que será procesada (3GPP, 2017).
Xlating FIR Filter (Center Freq)	6 MHz	La frecuencia central del filtro se desplazó a 6 MHz respecto de la frecuencia de referencia para analizar una región del espectro utilizada como estimación del piso de ruido (ITU-R, 2019).
Bloque Moving Average	De 5000 a 10000	En zonas montañosas puede presentarse shadowing o desvanecimiento por sombra debido a la presencia de obstáculos y variaciones del terreno. (Lee, 1993).

Nota. Elaboración propia.

Las condiciones del entorno montañoso pueden generar pérdidas de señal debido a obstáculos físicos, reflexiones del terreno y efectos de desvanecimiento lento (Slow Fading), perturbando la potencia recibida durante las mediciones. Por ello, en la tabla 9 se muestran los parámetros configurados del sistema SDR para optimizar la recepción y obtener resultados adecuados en zonas montañosas.

En zonas urbanas, la proximidad a estaciones base y fuentes de radiofrecuencia puede formar niveles elevados de potencia que afectan la medición debido a posibles saturaciones del receptor SDR. Por eso, se ajustaron los parámetros de ganancia y filtrado del sistema para controlar la señal recibida, evitar distorsiones y mejorar la estimación del comportamiento espectral. Los valores configurados para este escenario se presentan a continuación.

Tabla 10: Variables para la zona urbana

Variable	Valor	Descripción
RF Gain	0 dB	Se reduce la ganancia de RF para impedir la saturación del receptor debido a los altos niveles de potencia presentes en zonas urbanas. (Pozar, 2011).
IF Gain	16 dB	Permite ajustar la amplitud de la señal en banda base, impidiendo la saturación del ADC y favoreciendo la estabilidad de las mediciones de potencia. (Razavi, 2011).
BB Gain	20 dB	Permite limitar la señal al ancho de banda de interés y analizar portadoras LTE configuradas según la canalización establecida por 3GPP. (Proakis & Manolakis, 2007).
Bloque Low Pass Filter, variable Cutoff	10 MHz	Las operadoras despliegan el ancho de banda máximo de 20 MHz que en banda base compleja vendría a ser un corte de -10 MHz a +10 MHz, esta frecuencia de corte permite el paso de un canal LTE completo de 20 MHz (3GPP, 2017).
Bloque Xlating FIR Filter,	9.5 MHz	Permite trasladar la región espectral analizada hacia la zona de interés para suministrar la

variable Center Freq		evaluación de niveles de potencia y ruido (3GPP, 2017).
-------------------------	--	---

Nota. Elaboración propia.

En este caso, se debe tener en cuenta que existen nodos eNodeB muy cerca unos de otros, y la saturación de ruido electromagnético y multitrayectoria. Es por eso por lo que en la tabla 10 se muestran los valores configurados de las ganancias para evitar que el receptor se sature y distorsione los cálculos de RSSI y SNR.

En el entorno costero se consideran factores como la proximidad al mar, posibles interferencias externas y variaciones en la propagación de la señal. Por ello, en la tabla 11 se presentan los parámetros configurados del receptor SDR.

Tabla 11: Variables para la zona costera

Variable	Valor	Descripción
RF Gain	0 dB	Al configurar este valor a 0 en este entorno, el amplificador de bajo ruido se mantiene apagado si la señal se establece frente a la costa (Pozar, 2011).
IF Gain	24 dB	Al aumentarle 8 dB se compensa la atenuación que se produce por la humedad salina sobre las microondas de 2.1 GHz según la recomendación de la ITU-R P.1546-5 (ITU-R, 2012).
BB Gain	24 dB	Se realiza un leve incremento para asegurar los promedios matemáticos de RSSI y se reflejen las variaciones del canal para que sean capturadas con

		suficiente resolución de bits en el ADC (Proakis & Manolakis, 2007).
Bloque Low Pass Filter, variable Cutoff	De 5 MHz a 7.5 MHz	En las zonas costeras o en zonas con una baja densidad de usuarios las operadoras realizan una fragmentación del espectro en canales medianos de 10 MHz a 15 MHz optimizando recursos, al acortar el filtro se limpia el ruido de los canales adyacentes (3GPP, 2018).
Bloque Xlating FIR Filter, variable Center Freq	8 MHz	Se reduce el tamaño del canal comercial activo para que el medidor lea el piso de ruido costero de la forma más perfecta posible siguiendo las directrices internacionales según la recomendación ITU-R SM.1753 (ITU-R, 2019).

Nota. Elaboración propia.

En la zona costera pueden presentarse condiciones de propagación con línea de vista sobre el agua, además de variaciones asociadas a las condiciones atmosféricas y a la ubicación de las estaciones base. Por estas razones, se ajustaron los parámetros del receptor de acuerdo con la configuración presentada en la Tabla 11.

En las zonas rurales, las señales LTE muestran mínimos niveles de potencia debido a la distancia y efectos de propagación. Se deben ajustar los parámetros de ganancia y filtrado del SDR para optimizar la recepción y obtener mediciones.

Tabla 12: Variables para la zona rural

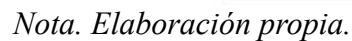
Variable	Valor	Descripción
RF Gain	14 dB	Es necesario activar la ganancia frontal del SDR HackRF One. El valor de 14 dB fue seleccionado

		para mejorar la recepción de señales de bajo nivel en este escenario. (Razavi, 2011).
IF Gain	De 30 a 40 dB	Se eleva la ganancia al máximo para potenciar las muestras de voltaje antes de la digitalización, al amplificar el voltaje en etapas intermedias se rescatan las muestras de RF del piso de ruido Térmico antes del proceso de digitalización (Razavi, 2011).
BB Gain	De 32 dB a 36 dB	Provee la amplificación necesaria al convertidor para que las muestras que sean débiles no se pierdan en el ruido del ADC (Proakis & Manolakis, 2007).
Bloque Low Pass Filter, variable Cutoff	2.5 MHz	En las áreas rurales los eNodeBs configuran los canales con un mínimo de 5 MHz para concentrar la potencia y maximizar el alcance. Al cerrar el filtro en 2.5 MHz se aísla el canal y se descartan megahercios llenos de ruido térmico capturado y elevando el SNR (3GPP, 2018).
Bloque Xlating FIR Filter, variable Center Freq	6 MHz	Como el canal rural útil solo ocupa de -2.5 MHz a +2.5 MHz, mover la frecuencia central del filtro a 6 MHz se sitúa en una zona que estaría vacía de transmisiones para medir el ruido estimado del campo siguiendo las recomendaciones de la ITU-R SM.1753-4 (ITU-R, 2019).

Nota. Elaboración propia.

En las zonas rurales el ruido electromagnético ambiental es mínimo pero la señal llega al límite de la sensibilidad del receptor. Se deben cerrar los filtros al mínimo para concentrar el nivel relativo estimado disponible y elevar el SNR como se propone en los parámetros mostrados en la tabla 12.

Figura 15: Diagrama de bloques en GNU Radio.



El diagrama de bloques implementa un flujo principal de monitoreo espectral en tiempo real, la señal del SDR HackRF One es recibida gracias al bloque “Osmocom Source”, la señal se divide en tres ramas de procesamiento de señal. En la figura 15 se muestra el diagrama de bloques junto con las variables en la parte superior, poseen puertos de entradas y salidas de distintos colores los cuales definen el tipo de dato matemático que fluye a través del diagrama de bloques, dichos colores son configurados de la siguiente manera:

- **Azul (Complex Float 32):** El color azul representa las muestras de los números complejos originados por dos variables flotantes de 14 bits; una para el componente en cuadratura (Q) y otra para el componente de la fase en fase (I). Este es el color estándar para las señales digitalizadas de Radiofrecuencia adquiridas mediante el SDR HackRF One y se digitalizan por medio del bloque osmocom source.
- **Naranja (Float 32):** Este color representa los números reales en punto flotante de 32 bits, se lo utiliza cuando la señal ya no tiene fase.
- **Gris (Message/PMT):** Los puertos grises que se observan en algunos bloques, sirven para dar paso asíncrono de mensajes de control, ráfagas de datos empaquetados o metadatos en vez de flujos de muestras continuas.

Bloque Osmocom Source

Este bloque es la fuente de datos principal del flujo y actúa como la interfaz entre el hardware SDR HackRF One y el entorno de procesamiento del software GNU Radio digitalizando la señal analógica de RF y entregando muestras I/Q (In-phase/Quadrature) complejas en formato float32.

Figura 16: Bloque Osmocom Source.

```

osmocom Source
Sync: Unknown PPS
MB0: Clock Source: External
Number Channels: 1
Sample Rate (sps): 20M
Ch0: Frequency (Hz): 2.132G
Ch0: Frequency Correction (ppm): 0
Ch0: DC Offset Mode: 0
Ch0: IQ Balance Mode: 0
Ch0: Gain Mode: False
Ch0: RF Gain (dB): 14
Ch0: IF Gain (dB): 40
Ch0: BB Gain (dB): 32
Ch0: Bandwidth (Hz): 20M
    
```

Nota. Elaboración propia.

Figura 17: Propiedades del bloque Osmocom Source.

Parameter	Value	Data Type
Output Type	Complex Float32	
Device Arguments	**	[string]
Sync	Unknown PPS	
Number MBoards	1	[int]
MB0: Clock Source	External	[string]
MB0: Time Source	Default	[string]
Number Channels	1	[int]
Sample Rate (sps)	samp_rate	[real]
Ch0: Frequency (Hz)	Frecuencia_central	[real]
Ch0: IQ Balance Mode	0	[int]
Ch0: Gain Mode	False	[bool]
Ch0: RF Gain (dB)	RF_Gain	[real]
Ch0: IF Gain (dB)	IF_Gain	[real]
Ch0: BB Gain (dB)	BB_Gain	[real]
Ch0: Antenna		[string]
Ch0: Bandwidth (Hz)	Bandwidth	[real]

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se especificarán los datos que se deben completar en el bloque de la figura 17, no obstante, hay que recordar que ciertos valores varían dependiendo la zona a analizar según las tablas 9, 10, 11 y 12:

Tabla 13: Configuración del bloque Osmocom

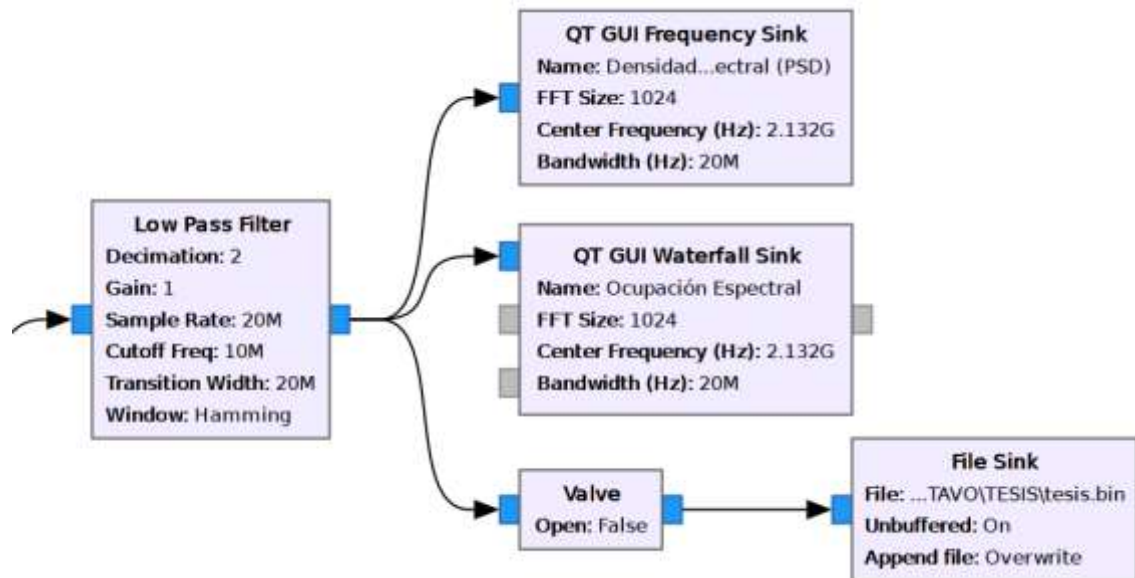
Parámetro	Valor configurado	Descripción
Device Arguments	hackrf=0	Selecciona el HackRF One conectado por USB
Sync	Unknown PPS	Sin sincronización de tiempo externa
Number of Channels	1	Canal único de recepción
Sample Rate (samp_rate)	20M (20 Msps)	Cubre BW observable de 20 MHz
Ch0: Frequency (Hz)	2.132G	Canal downlink LTE AWS – operador principal
Ch0: Frequency Correction (ppm)	0	Sin corrección (TCXO interno del HackRF)
Ch0: DC Offset Mode	0 (Off)	Corrección DC desactivada
Ch0: I/Q Balance Mode	0 (Off)	Corrección I/Q desactivada
Ch0: Gain Mode	False (Manual)	Control manual de ganancia
Output Type	Complex (I/Q float32)	Muestras I/Q complejas de 32 bits

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se explicará qué realiza cada rama.

Rama 1: Procesamiento digital de señal (DSP)

Figura 18: Procesamiento digital de señal (DSP).



Nota. Elaboración propia.

En la figura 18 se muestra la primera rama, la cual se encarga del análisis visual en tiempo del espectro radioeléctrico en la banda AWS y del almacenamiento controlado de la información, la rama recibe muestras de alta velocidad las cuales se someten a un filtrado pasabajos para aislar el canal de interés reduciendo la tasa de datos y finalmente se distribuye la señal hacia los analizadores gráficos y un sumidero de archivos. Esta rama permite verificar de forma visual las portadoras LTE activas, su ancho de banda y la presencia de interferencias mediante mapas de calor en cascada. El almacenamiento de los datos en un archivo de tipo “.bin” permite el análisis de las muestras sin necesidad de volver a las zonas de muestreo de la señal LTE.

La salida del Low Pass Filter se divide en 3 caminos paralelos, el primero se conecta a la interfaz gráfica de la densidad espectral de potencia (QT GUI Frequency Sink), el segundo camino conecta la gráfica de histórico temporal (QT GUI Waterfall Sink) y el tercer camino pasa por un interruptor (valve) el cual es controlado por el usuario para finalmente escribir los datos en el disco duro mediante el bloque (File Sink) en un archivo de tipo “.bin”.

Ecuaciones matemáticas aplicadas

Los bloques transforman las muestras del dominio del tiempo discreto $x[n]$ al dominio de la frecuencia mediante la Transformada discreta de Fourier (DFT) calculada a través del algoritmo de FFT de N punto ($N = 1024$);

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * w[n] * e^{\frac{-j2\pi kn}{N}}$$

Ecuación 6: Transformada discreta de Fourier con ventana (Windowed DFT).

Donde:

- $X[k]$ es el resultado de la Transformada de Fourier.
- k es el índice de la frecuencia discreta.
- n es el índice del tiempo discreto
- N es el número total de puntos o muestras.
- $x[n]$ es la señal de entrada
- $w[n]$ representa la función de ventaneo de Hamming.
- j es la unidad imaginaria ($\sqrt{-1}$).

Posteriormente para representar de manera gráfica en decibelios (dB) se calcula la densidad espectral de potencia (PSD):

$$PSD[k] = 10 \log_{10} \left(\frac{|X[k]|^2}{N * f_s} \right)$$

Ecuación 7: Densidad espectral de potencia (power spectral density, PSD).

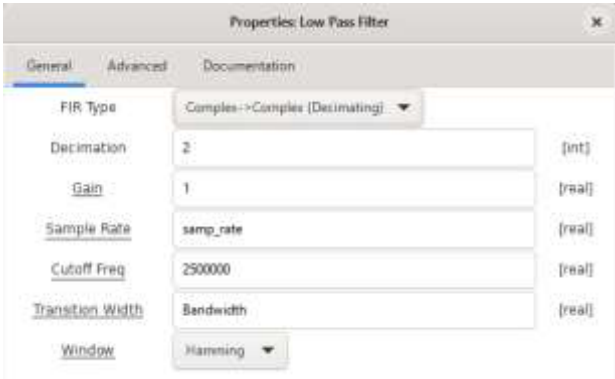
Donde:

- $PSD[k]$ es el valor de la densidad espectral de potencia.
- $\log_{10}$ es el logaritmo en base 10.
- $X[k]$ es la Transformada de Fourier.
- $|X[k]|$ representa el módulo de la Transformada de Fourier.

Al aplicar estas ecuaciones se obtiene una gráfica de amplitud vs frecuencia por medio del bloque QT GUI Frequency Sink, un espectrograma continuo en el que se muestran las señales en el dominio del tiempo mediante el bloque Waterfall y un archivo binario con las muestras complejas flotantes de 32 bits almacenados en el disco duro de la computadora.

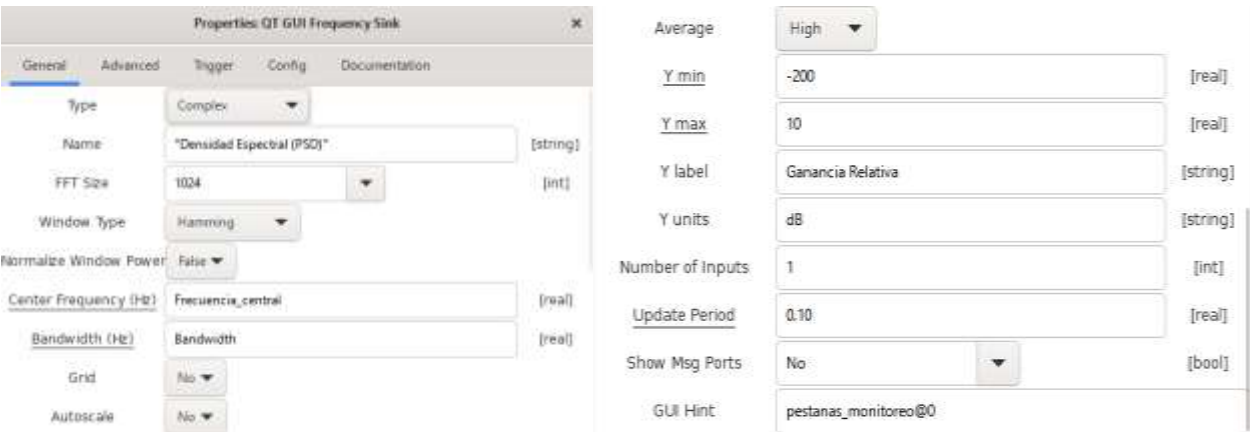
Configuración de bloques de la rama 1

Figura 19: Propiedades del bloque Low Pass Filter.



Nota. Elaboración propia.

Figura 20: Propiedades del bloque QT GUI Frequency Sink



Nota. Elaboración propia.

En las figuras 20 y 21 se muestran las propiedades del bloque Low Pass Filter y las propiedades del bloque QT GUI Frequency Sink respectivamente.

Figura 21: Propiedades del bloque QT GUI Waterfall Sink.

Properties: QT GUI Waterfall Sink		
General		
Type	Complex	
Name	Ocupación Espectral	[string]
FFT Size	1024	[int]
Window Type	Blackman-harris	
Center Frequency (Hz)	Frecuencia_central	[real]
Bandwidth (Hz)	Bandwidth	[real]
Intensity Min	-200	[float]
Intensity Max	10	[float]
Grid	No	
Number of Inputs	1	[int]
Update Period	0.10	[real]
Show Msg Ports	Yes	[bool]
GUI Hint	pestanas_monitoreo@1	
OK Cancel Apply		

Nota. Elaboración propia.

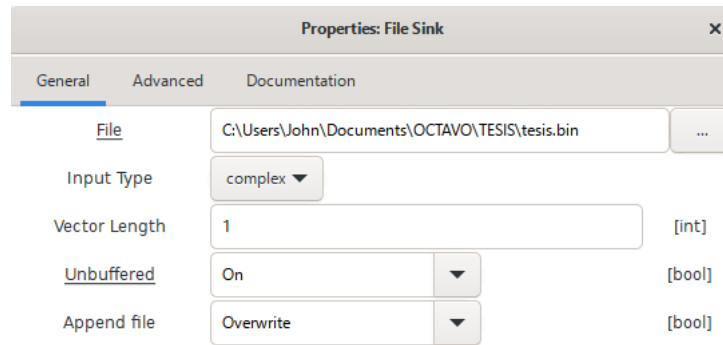
Figura 22: Propiedades del bloque Valve.

Properties: Valve		
General		
Type	complex	
Open	Grabar	
Vec Length	1	[int]
OK Cancel Apply		

Nota. Elaboración propia.

En la figura 21 se muestran las propiedades del bloque QT GUI Waterfall Sink mientras que en la figura 22 se observan las propiedades del bloque Valve.

Figura 23: Propiedades del bloque File Sink.

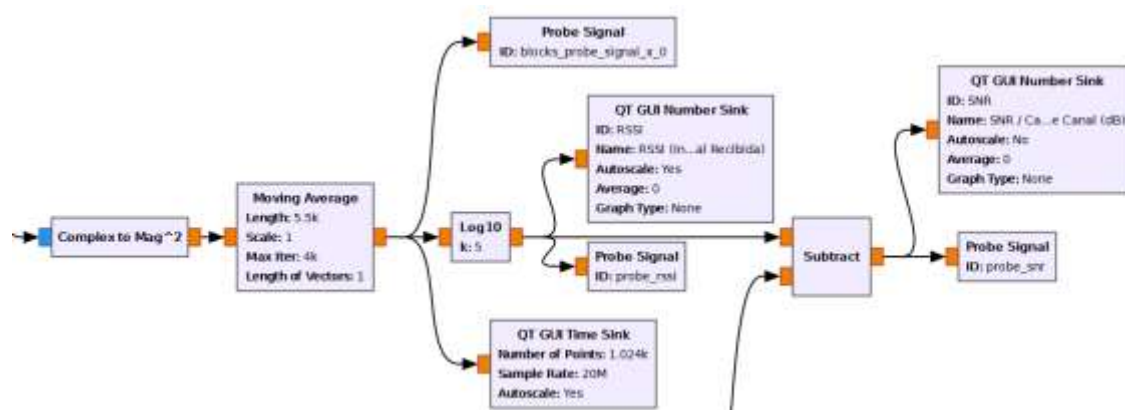


Nota. Elaboración propia.

Se muestran las propiedades del bloque File Sink en la figura 23.

Rama 2: Estimación de potencia total recibida – RSSI

Figura 24: Estimación de potencia de banda ancha (RSSI / RSRP)



Nota. Elaboración propia.

En la figura 24 se observa la rama 2 del diagrama de bloques la cual está encargada de realizar la estimación de potencia recibida de banda ancha, esta rama toma las muestras complejas de alta velocidad del sintonizador de radio y convierte las muestras complejas en una representación de magnitud al cuadrado para obtener una medida proporcional a la potencia de la señal. Esta rama realiza el procesamiento de la señal RF cruda, es decir, sin filtrado directamente desde el receptor SDR para el cálculo matemático de la potencia total instantánea que ingresa por

la antena promediando las variaciones térmicas de alta velocidad para entregar una métrica limpia de la intensidad de la señal recibida (RSSI). El RSSI (received signal strength indicator) es el parámetro estándar global de la industria móvil para la cuantificación de los niveles de cobertura y al no pasar por el filtro pasa bajos estima el nivel relativo presente en la entrada del hardware.

En la tecnología 4G LTE, la señal viaja a través de ráfagas sumamente rápidas que se dividen en miles de subportadoras (OFDMA). Si se intentara asimilar la potencia de una sola vez de forma directa desde la antena, se obtendría un valor que oscilaría de forma caótica a millones de veces por segundo, imposibilitando una lectura limpia de la señal. Por esta razón, se utilizan los bloques mostrados en la figura 23.

El bloque (Complex to Mag²) extrae la potencia lineal instantánea, la salida de este bloque se conecta con la entrada del bloque (Moving Average) el cual es un filtro de media móvil que suaviza el ruido del canal, y su salida se extiende por 3 caminos distintos:

- **1er camino:** El bloque Probe Signal toma los valores de la salida del moving average y los almacena.
- **2do camino:** Los datos se envían al bloque QT GUI Time Sink, el cual permitirá visualizar la señal en el dominio del tiempo.
- **3er camino:** Se ingresan los datos en el bloque Log10 para la conversión de los datos de escala lineal a escala logarítmica, una vez transformados en dB se divide en tres partes de forma simultánea:
 1. Los datos se ingresan a un bloque para mostrar el RSSI.
 2. El bloque “Probe Signal” toma los valores de la salida y los almacena.
 3. Los datos se ingresan al bloque “Subtract” para realizar otro proceso que se explicará más adelante.

Ecuaciones matemáticas aplicadas

La extracción de la potencia instantánea lineal es un número complejo que se define como $z = I + jQ$, el bloque “Complex to Mag²” elimina la parte imaginaria aplicando el cuadrado de la norma euclidiana:

$$P_{inst}[n] = |z[n]|^2 = I[n]^2 + Q[n]^2$$

Ecuación 8: Potencia instantánea de una señal discreta en representación I/Q.

Donde:

- $P_{inst}[n]$ es la potencia instantánea.
- n es el índice del tiempo discreto.
- $z[n]$ es la muestra de la señal compleja de entrada.
- $I[n]^2$ es el componente en fase.
- $Q[n]^2$ es el componente en cuadratura.

Para el suavizado temporal del filtro de media móvil el bloque calcula el promedio aritmético de las últimas muestras para obtener la potencia promedio lineal y lo hace mediante la ecuación:

$$P_{prom}[n] = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} P_{inst}[n - m]$$

Ecuación 9: Potencia promedio en tiempo discreto

Donde:

- $P_{prom}[n]$ es la potencia promediada lineal.
- L es la longitud de la ventana del filtro.
- m es la variable de control o índice secundario.
- $P_{inst}[n - m]$ representa las muestras de potencia instantánea pasadas.
- $\frac{1}{L}$ es el promedio aritmético.

La conversión a decibelios de escala logarítmica se genera en el bloque “Log10”, este bloque aplica el logaritmo base 10 para convertir a decibelios la potencia. La ecuación matemática estándar requiere un factor multiplicador de 10 el cual se compensa analíticamente en la configuración final o se multiplica de forma interna.

$$RSSI_{relativo} = \log_{10}(P_{prom}[n])$$

Ecuación 10: Indicador de intensidad de señal recibida relativa (RSSI relativo).

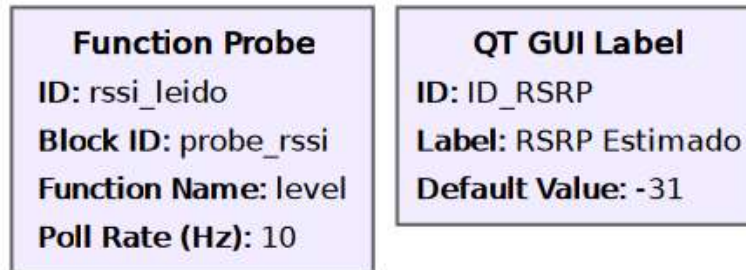
Donde:

- $RSSI_{relativo}$ es el indicador de fuerza de la señal recibida relativo.
- $\log_{10}$ es la función logarítmica en base 10.
- $P_{prom}[n]$ es la potencia promediada lineal.

En general se obtiene un valor numérico decimal flotante en real, que representa la intensidad relativa de la potencia de la portadora LTE en escala logarítmica la cual varía notablemente según la zona geográfica. También se generan señales limpias y libres de fluctuaciones rápidas por desvanecimiento de canal. Se presenta el desempeño de los indicadores RSRP y RSRQ durante las mediciones realizadas.

Cabe destacar que la rama 2 no trabaja de forma individual, esta rama está encargada de alimentar a ciertas variables, en específico de dos bloques:

Figura 25: Bloques con relación directa con la rama 2 del sistema.



Nota. Elaboración propia.

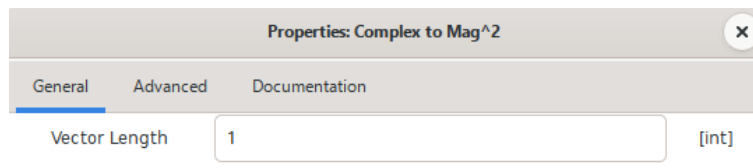
En la figura 25 se observan los bloques “Function Probe” y un bloque de “QT GUI Label”, y se relacionan de la siguiente manera:

- El bloque “Function Probe” es la comunicación con el bloque “Block ID: probe_rssi”, extrae el valor de tipo flotante del bloque “Probe Signal (probe_rssi)”, con la frecuencia de Poll Rate este viaja periódicamente 10 veces por segundo y se guarda con el nombre de “rssi_leido” dentro de la memoria de Python.
- El bloque “QT GUI Label” utiliza el valor obtenido de la rama 2 y aplica el ajuste definido en la implementación para obtener una estimación relativa del RSRP. Este valor se presenta

como una estimación derivada del procesamiento realizado y no como una medición calibrada del parámetro.

Configuración de bloques de la rama 2

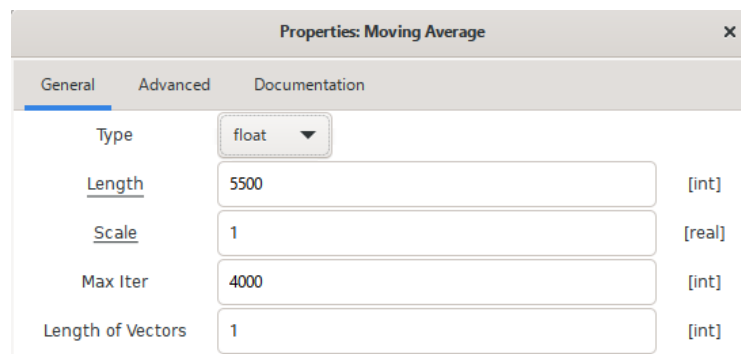
Figura 26: Propiedades del bloque Complex to Mag²



Properties: Complex to Mag ²		
General	Advanced	Documentation
Vector Length	1	[int]

Nota. Elaboración propia.

Figura 27: Propiedades del bloque Moving Average.



Properties: Moving Average		
General	Advanced	Documentation
Type	float	
Length	5500	[int]
Scale	1	[real]
Max Iter	4000	[int]
Length of Vectors	1	[int]

Nota. Elaboración propia.

Se observan las propiedades del bloque “Complex to Mag²” en la figura 26 mientras que en la figura 27 se muestran las propiedades del bloque “Moving Average”.

Figura 28: Propiedades del bloque QT GUI Time Sink.

Properties: QT GUI Time Sink		
General Advanced Trigger Config Documentation		
Type	Float	
Name	"Señal en el Dominio del Tiempo"	[string]
Y Axis Label	Amplitude	[string]
Y Axis Unit	""	[string]
Number of Points	1024	[int]
Sample Rate	samp_rate	[float]
Grid	No	
Autoscale	Yes	
Y min	-1	[float]
Y max	1	[float]
Number of Inputs	1	[int]
Update Period	0.10	[float]
Disp. Tags	Yes	
GUI Hint	pestanas_monitoreo@0	
		OK Cancel Apply

Nota. Elaboración propia

Figura 29: Propiedades del bloque Probe Signal.

Properties: Probe Signal	
General Advanced Documentation	
ID	blocks_probe_signal_x_0
Input Type	float

Nota. Elaboración propia.

En las figuras 28 y 29 se observan las propiedades del bloque “QT GUI Time Sink” y las propiedades del bloque “Probe Signal” respectivamente.

Figura 30: Propiedades del bloque Log10.

Properties: Log10		
General	Advanced	Documentation
n	10	[real]
k	5	[real]
Vector Length	1	[int]

Nota. Elaboración propia.

Figura 31: Propiedades del bloque Probe Signal.

Properties: Probe Signal	
General	Advanced
ID	probe_rssi
Input Type	float ▼

Nota. Elaboración propia.

En la figura 30 se muestran las propiedades del bloque “Log10” mientras que en la figura 31 se muestran las propiedades del bloque “Probe Signal”.

Figura 32: Propiedades del bloque QT GUI Number Sink.

Properties: QT GUI Number Sink			
General	Advanced	Config	Documentation
ID	RSSI		
Name	"RSSI (Indicador de Fuerza de la Señal Recibida)"		[string]
Input Type	float ▼		
Autoscale	Yes ▼		
Average	0		[float]
Graph Type	None ▼		
Number of Inputs	1		[int]
Min	0		[float]
Max	50		[float]
Update Period	0.10		[float]
GUI Hint	pestanas@5		
		OK	Cancel Apply

Nota. Elaboración propia.

Figura 33: Propiedades del bloque Subtract.

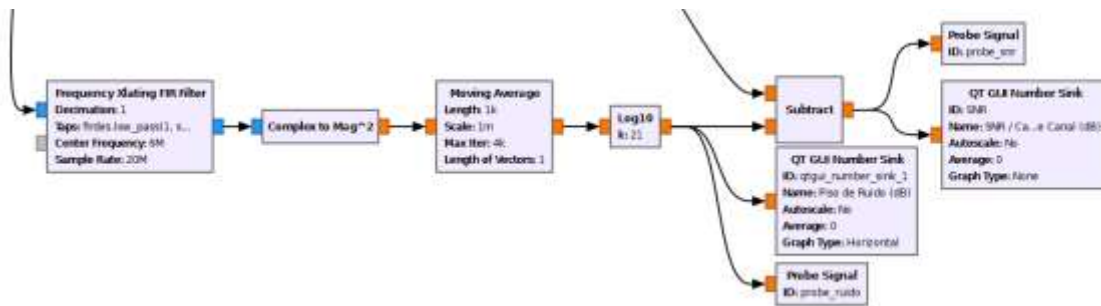
Properties: Subtract		
General	Advanced	Documentation
ID Type	float ▼	
Vector Length	1	[int]
Num Inputs	2	[int]

Nota. Elaboración propia.

En las figuras 32 y 31 se muestran las propiedades del bloque “QT GUI Number Sink” y las propiedades del bloque “Subtract” respectivamente.

Rama 3: Aislamiento del piso de ruido y conmutación de la SNR

Figura 34: Aislamiento del piso de ruido y conmutación de la SNR. 102



Nota. Elaboración propia.

En la figura 34 se muestra la tercera rama en la cual es la parte más sofisticada del diagrama. Se realiza un proceso heterodino digital desplazando la frecuencia central de recepción para enfocarse deliberadamente fuera del canal LTE activo. Al sintonizar una zona sin transmisión comercial se procesa una porción del espectro para calcular la potencia del piso de ruido térmico y ambiental para luego restarlo del RSSI y así calcular de forma automática la relación señal a ruido (SNR).

En el entorno de las telecomunicaciones la estimación del RSSI no es suficiente para determinar la calidad de la señal, una señal puede ser muy fuerte, pero estar distorsionada por completo por el ruido o interferencia. La SNR relaciona la potencia de la señal con la del ruido y se estima automáticamente en GNU Radio a partir de las muestras del HackRF One.

El bloque “Frequency Xlating FIR Filter” desplaza y filtra la señal para aislar una zona representativa del ruido. Las muestras resultantes pasan por el bloque “Complex to Mag²”, que permite obtener la magnitud al cuadrado de la señal y, por tanto, una representación de potencia lineal. Posteriormente, el bloque “Moving Average” realiza un promedio móvil para suavizar las variaciones de la señal. Finalmente, el bloque Log10 aplica la transformación logarítmica al valor de potencia obtenido, permitiendo expresar el nivel relativo en escala logarítmica.

- **1er camino:** El valor del piso de ruido se conecta a la pantalla digital de ruido, el cual es el bloque “QT GUI Number Sink”.
- **2do camino:** El bloque “Probe Signal” toma los valores de la salida Log10 y los almacena.

- **3er camino:** Se ingresan los datos a la entrada inferior del bloque de restar “Subtract”, en este bloque se resta la información del ruido de la rama 3 con la información del RSSI (rama 2) y la información se divide en 2 sub-caminos:
 1. Se conecta a la entrada del segundo bloque “QT GUI Number Sink” y se muestra el resultado de la SNR.
 2. El bloque “Probe Signal” toma los valores de la salida Log10 y los almacena.

Ecuaciones matemáticas aplicadas

Para la traslación de frecuencia espectral se multiplica la señal de tiempo discreto de entrada por una señal sinusoidal compleja con frecuencia de oscilación focal $f_c = 8 \text{ MHz}$ provocando un desplazamiento frecuencial exacto hacia la derecha mediante la siguiente ecuación:

$$x_{desplazada}[n] = x[n]e^{\frac{-j2\pi f_c n}{f_s}}$$

Ecuación 11: Señal discreta desplazada en frecuencia (frequency shift en dominio discreto).

Donde:

- $X_{desplazada}[n]$ es la señal resultante en el dominio del tiempo discreto.
- $x[n]$ es la señal de entrada original.
- j es la unidad imaginaria ($\sqrt{-1}$).
- f_c es la frecuencia de corte o de oscilación local.
- f_s es la frecuencia de muestreo del sistema.

La señal desplazada pasa por un filtro FIR pasa bajos que atenúa las componentes externas a la región seleccionada, permitiendo calcular posteriormente la potencia promedio del ruido.

Y se calcula mediante:

$$x_{ruido_filtrado}[n] = \sum_{m=0}^{M-1} h[m] x_{desplazada}[n - m]$$

Ecuación 12: Convolución discreta (filtrado de señal o modelado de ruido).

Donde:

- $x_{ruido_filtrado}[n]$ es la señal limpia de ruido.
- M es el número de coeficientes o “taps”.
- m es la variable de control o índice de la sumatoria.
- $h[m]$ representa los coeficientes del filtro FIR.
- $x_{desplazada}[n - m]$ son las muestras anteriores de la señal desplazada.

En el cálculo de potencia de ruido pasa por el mismo proceso matemático de la rama 2 para el cálculo de la RSSI, lo que da como resultado:

$$Ruido_{relativo} = \log_{10}(P_{ruido_prom}[n])$$

Ecuación 13: Nivel relativo de ruido (en escala logarítmica).

Donde:

- $Ruido_{relativo}$ es el nivel de potencia de ruido expresado en escala logarítmica.
- $P_{ruido_prom}[n]$ es el valor numérico de la potencia promedio del ruido.

Se utiliza el bloque Subtract para estimar la SNR calculando la diferencia entre la potencia de la señal y el ruido en escala de logaritmos. Esta operación es equivalente a calcular, en escala lineal, la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido. Esto puede calcularse de 2 formas distintas:

$$SNR_{calculada} = RSSI_{relativo} - Ruido_{relativo}$$

$$SNR_{calculada} = \log_{10}(P_{prom}) - \log_{10}(P_{ruido_prom}) = \log_{10}\left(\frac{P_{prom}}{P_{ruido_prom}}\right)$$

Ecuación 14: Relación señal-ruido (signal-to-noise ratio, SNR).

Donde:

- $SNR_{calculada}$ es la relación señal a ruido.
- $RSSI_{relativo}$ es el logaritmo de la potencia total de la señal recibida.

- $Ruido_{relativo}$ es el logaritmo de la potencia del ruido aislado.
- P_{prom} es la potencia promediada lineal de la señal.
- P_{ruido_prom} es la potencia promediada lineal del ruido de fondo.

Estas ecuaciones dan como resultado un valor numérico que registra el piso de ruido del entorno y el índice de SNR expresado de forma matemática lo más exacta posible.

Configuración de bloques de la rama 3

Figura 34: Propiedades del bloque Frequency Xlating FIR Filter.

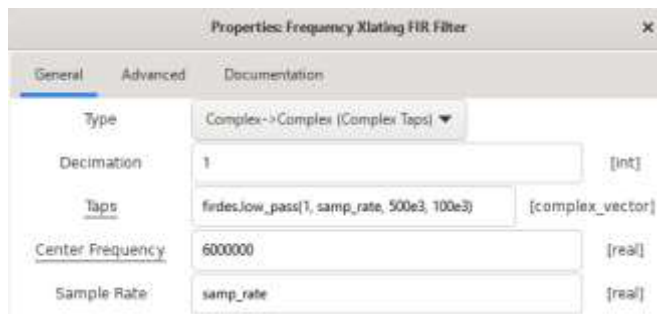
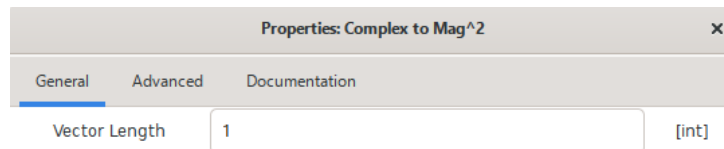


Figura 35: Propiedades del bloque Complex to Mag^2.



En la figura 35 se muestran las propiedades del bloque “Frequency Xlating FIR Filter” y en la figura 36 las propiedades del bloque “Complex to Mag2”.

Figura 36: Propiedades del bloque Moving Average.

Properties: Moving Average		
General	Advanced	Documentation
Type	float	
Length	1000	[int]
Scale	1/1000	[real]
Max Iter	4000	[int]
Length of Vectors	1	[int]

Figura 37: Propiedades del bloque Log10.

Properties: Log10		
General	Advanced	Documentation
n	10	[real]
k	21	[real]
Vector Length	1	[int]

En la figura 37 se observan las propiedades que deben colocarse en el bloque “Moving Average” mientras que las propiedades del bloque “Log10” se muestran en la figura 38.

Figura 38: Propiedades del bloque QT GUI Number Sink.

Properties: QT GUI Number Sink			
General	Advanced	Config	Documentation
ID	qtgui_number_sink_1		
Name	"Piso de Ruido (dB)"	[string]	
Input Type	float		
Autoscale	No		
Average	0	[float]	
Graph Type	Horizontal		
Number of Inputs	1	[int]	
Min	-40	[float]	
Max	0	[float]	
Update Period	0.10	[float]	
GUI Hint	pestanas_monitoreo@3		

Figura 39: Propiedades del bloque Probe Signal.

Properties: Probe Signal

General

Advanced

Documentation

ID

probe_ruido

Input Type

float

En las figuras 39 y 40 se muestran las propiedades que deben colocarse en el bloque “QT GUI Number Sink” y las propiedades del bloque “Probe Signal” respectivamente.

Figura 40: Propiedades del bloque QT GUI Number Sink (SNR).

Properties: Probe Signal

General

Advanced

Documentation

ID

probe_snr

Input Type

float

Figura 41: Propiedades del bloque Probe Signal.

Properties: QT GUI Number Sink

General

Advanced

Config

Documentation

ID

SNR

Name

"SNR / Calidad de Canal (dB)"

[string]

Input Type

float

Autoscale

No

Average

0

[float]

Graph Type

Horizontal

Number of Inputs

1

[int]

Min

0

[float]

Max

50

[float]

Update Period

0.10

[float]

GUI Hint

pestanas_monitoreo@4

En la figura 41 se muestran las propiedades del bloque “QT GUI Number Sink” (SNR) mientras que en la figura 42 se observan las propiedades del bloque “Probe Signal”.

3.4 Ejemplo de cálculo aplicado: Verificación numérica de la SNR

Para contrastar de forma cuantitativa las ecuaciones presentadas anteriormente con los resultados obtenidos experimentalmente, a continuación, se desarrolla un ejemplo de cálculo aplicando la ecuación 14 (relación señal-ruido) sobre los valores estimados reportados en la tabla 16 y 19 para la zona urbana y la zona montañosa, correspondientes a las condiciones de mejor y peor desempeño del estudio, respectivamente.

Según la configuración del bloque Log10 empleada en el flujo de procesamiento de la figura 38 se incorpora el factor multiplicativo estándar de conversión a decibelios expresado de la siguiente forma:

$$SNR_{calculada} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{prom}}{P_{ruido_prom}} \right)$$

Al despejar se obtiene:

$$\frac{P_{prom}}{P_{ruido_prom}} = 10^{10SNR/10}$$

Para la zona urbana, según la tabla 16 el sistema reporta para esta zona un piso de ruido $Ruido_{Relativo} = -80.06 \text{ dB}$ y una SNR calculada de 28.34 dB . Sustituyendo este valor en la expresión anterior:

$$\frac{P_{prom}}{P_{ruido_prom}} = 10^{10(28.34)/10} = 10^{10(2.834)} \approx 682.5$$

Es decir, la potencia promedio de la portadora fue aproximadamente 682.5 veces mayor que la potencia promedio del ruido de fondo en la zona urbana.

Para la zona montañosa. Se repite el procedimiento utilizando el valor de SNR reportado en la Tabla 19 (SNR calculada = 12.83 dB):

$$\frac{P_{prom}}{P_{ruido_prom}} = 10^{10(12.83)/10} = 10^{10(1.283)} \approx 19.2$$

En este caso la potencia de la portadora es solo ≈ 19.2 veces la del ruido, es decir, una relación de potencia unas 35 veces menor que en la zona urbana ($682.5 / 19.2 \approx 35.5$). Este resultado numérico respalda de forma directa lo observado en las figuras 93 y 94, donde la zona montañosa presenta la barra de SNR más baja y el piso de ruido más elevado de las cuatro zonas evaluadas.

Como verificación adicional de consistencia interna, se puede recuperar el nivel relativo de señal ($RSSI_{Relativo}$) a partir de la primera forma de la ecuación 17 ($SNR_{Calculado} = RSSI_{Relativo} - Ruido_{Relativo}$), despejando para la zona urbana:

$$RSSI_{Relativo} = SNR_{Calculado} + Ruido_{Relativo} = 28.34 + (-80.06) = -51.72 \text{ dB}$$

3.5 Procedimiento experimental

3.5.1 Protocolo general de estimación

El siguiente protocolo se aplica en cada punto de medición seleccionado. Para garantizar la repetibilidad de las mediciones, en todos los casos se siguió el mismo protocolo de captura de datos.

- Conectar la antena omnidireccional al puerto RF del HackRF One mediante cable SMA de 50Ω .
- Conectar el HackRF One al puerto USB del computador. Windows reconocerá el dispositivo automáticamente con los drivers Osmocom instalados.
- Abrir G-NetTrack Lite en el dispositivo móvil y registrar: operador LTE, banda, EARFCN, RSRP y RSRQ del punto de medición.
- Abrir GNU Radio Companion y cargar el archivo PROGRAMA_01.
- Verificar que el bloque Osmocom Source esté configurado con: hackrf=0.
- Ejecutar el flujo GRC presionando el botón Run (▶) o el atajo F6
- Observar el QT GUI Frequency Sink: verificar la presencia de la frecuencia espectral LTE.
- Registrar capturas de pantalla del espectro FFT y del espectrograma Waterfall en el momento de mayor estabilidad de la señal.

- Activar el bloque “File Sink” para almacenar las muestras I/Q durante un intervalo comprendido entre 5 y 10 minutos.
- Finalizar la captura, detener el flujo de GNU Radio y comprobar la correcta generación del archivo de muestras.
- Registrar en la bitácora: la información obtenida en la hoja de campo para su posterior procesamiento y análisis.

3.5.2 Parámetros registrados durante las mediciones

En cada punto de estimación se registraron los parámetros técnicos necesarios para caracterizar el comportamiento espectral de la red LTE y garantizar la reproducibilidad del estudio. La tabla siguiente resume las variables registradas durante la operación experimental, se realizaron mediciones en tres puntos ubicados a diferentes distancias del eNodeB. La selección de estas distancias permitió obtener estimaciones relativas de nivel de potencia recibida, la relación señal-ruido y los niveles de interferencia en función de la separación respecto a la estación base.

Tabla 14: Variables registradas durante la prueba experimental

Parámetro	Unidad	Descripción
Piso de ruido	dB	Nivel promedio de ruido presente en el canal.
SNR	dB	Relación señal-ruido estimada a partir del análisis espectral.
RSSI estimado	dBm	Intensidad total de la señal recibida.
RSRP estimado	dBm	Potencia de referencia de la señal LTE estimada mediante GNU Radio.
RSRQ estimado	dB	Calidad de la señal estimada a partir de los parámetros espectrales.
Tasa de bajada estimada	Mbps	Velocidad teórica estimada en función del SNR obtenido.

Ganancia total	dB	Configuración total de ganancia aplicada al HackRF One (RF, IF y BB).
Altura de la antena	m	Distancia entre la antena receptora y el nivel del suelo.
Distancia al eNodeB	m	Distancia aproximada entre el punto de medición y la estación base LTE.

Nota. Elaboración propia.

3.5.3 Características de la antena utilizada durante las mediciones

Tabla 15: Características de la antena

Parámetro	Especificación
Modelo	ANT500
Tipo	Antena telescópica de banda ancha
Rango de frecuencia	Según la ficha técnica del fabricante
Polarización	Vertical
Altura respecto al suelo	1,5 m
Conector	SMA macho
Impedancia	50 Ω
Ganancia	No especificada por el fabricante (variable según la frecuencia de operación)

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 15 se muestran las características de la antena que se utilizó ANT500 conectada al HackRF One. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, la antena presenta un rango de operación nominal de 75 MHz a 1 GHz y una impedancia de 50 Ω , se utilizó en la

banda AWS ($\approx 2,1$ GHz) con fines de recepción y estimación relativa de la señal, considerando que el HackRF One admite operación hasta 6 GHz, ubicada a una altura física de 1,5 m respecto al nivel del suelo. Para la ANT500 original, el fabricante no especifica una ganancia fija en dBi. La razón es que es una antena de banda ancha, y la ganancia varía con la frecuencia. Por esa razón no se asumió un valor constante en la metodología y los resultados se presentan como estimaciones relativas del comportamiento de la señal.

Parámetros de adquisición de datos

En todas las estimaciones se empleó la configuración en la Sección 3.2.1. Se utilizó de forma constante la antena ANT500 en polarización vertical y se configuró una tasa de muestreo de 20 MS/s (20 millones de muestras por segundo). En cada punto de medición se realizó una captura continua de 60 segundos, lo que permitió procesar aproximadamente 1 200 000 000 muestras ($1,2 \times 10^9$ muestras) por registro. Esta configuración se mantuvo constante durante todas las estimaciones para garantizar la uniformidad en la adquisición de los datos.

Cálculo del número de muestras

La fórmula es:

$$\text{Numero de muestras} = \text{Tasa de muestreo} \times \text{Tiempo de captura}$$

Ecuación 15: Cálculo del número de muestras

Donde:

- Tasa de muestreo = 20 MS/s = 20 000 000 muestras/s
- Tiempo de captura = 60 s

Entonces:

$$20\,000\,000 \times 60 = 1\,200\,000\,000$$

Teóricamente, una captura de 60 s a 20 MS/s corresponde a 1 200 000 000 muestras.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos durante mediciones realizadas en las cuatro zonas geográficas: urbana, rural, costera y montañosa de monitoreo espectral de la red móvil 4G LTE en la banda AWS realizadas mediante el sistema desarrollado con SDR HackRF One y GNU Radio, permitiendo analizar el comportamiento de diversos indicadores. Tal como se menciona en el punto 1.8.6, sección b, el dispositivo SDR HackRF One no fue sometido a un proceso de calibración mediante un dispositivo o software especializado para este tipo de equipos, por lo que los resultados obtenidos son sólo estimaciones y no deben considerarse equivalentes a los obtenidos mediante un analizador de espectro previamente calibrado o aplicaciones comerciales de análisis de redes inalámbricas.

Posteriormente, los valores estimados mediante GNU Radio muestran una tendencia de comportamiento similar a la observada mediante la aplicación G-NetTrack Lite. No obstante, esta comparación debe interpretarse como referencial, debido a que ambas herramientas emplean metodologías de medición diferentes, con el propósito de evaluar la concordancia entre ambas herramientas y contrastar los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta.

4.1 Resultados del monitoreo espectral obtenidos con GNU Radio (HackRF One)

A continuación, se presentan los resultados del monitoreo espectral realizado en cada una de las cuatro zonas de estudio. Para cada zona se muestran las capturas correspondientes a la densidad espectral de potencia (PSD), el espectrograma de ocupación espectral y las métricas estimadas de la red LTE, seguidas del análisis técnico correspondiente.

4.1.1 Zona urbana

Ficha técnica de las mediciones

Se realizaron tres capturas en esta zona, a distancias crecientes respecto al eNodeB más cercano, con el fin de evaluar el efecto de la distancia y del patrón de radiación sobre los indicadores obtenidos. En la figura 42 se observa una fotografía del eNodeB seleccionado para la zona urbana en la que se realizaron las mediciones.

Figura 42: Fotografía del entorno de la zona urbana



Figura 43: Captura del mapa Google Earth Pro con la ubicación de los tres puntos y del eNodeB de referencia.



En la figura 44 se observa una imagen satelital en la que se identifica, mediante un marcador de color azul, el eNodeB de la zona urbana y de color rojo las distancias de 15 metros, 150 metros y 300 metros en la que se tomaron las muestras. Con el propósito de caracterizar el comportamiento de la señal LTE en los diferentes escenarios de evaluación, se estimaron diversos indicadores mediante GNU Radio y el dispositivo HackRF One. La tabla 16 resume los valores obtenidos para cada punto de estimación, permitiendo analizar diferentes indicadores relacionados con la potencia, calidad y comportamiento de la señal recibida.

Tabla 16: Indicadores obtenidos (GNU Radio/HackRF One) de la zona urbana

Punto	Distancia al eNodeB (m)	Coordenadas GPS	Fecha y hora	Piso de ruido de la señal útil(dB)	RSSI estimado (dBm)	RSRP estimado (dBm)	RSRQ estimado (dB)	SNR estimado (dB)	Piso de ruido instrumental (dBm)	Tasa de bajada estimada (Mbps)
P1	300	Latitud: - 2.226724 Longitud: - 80.869050	21/07/2026 8:09	-80	-77	-120	-10	24.2	-80	84.396
			26/07/2026 11:58	-75	-63	-86	-8	26	N/A	85.828
			26/07/2026 14:58	-50	-62	-86	-10	19	-112	72.338
P2	150		21/07/2026	-82	-74	-120	-10	22.6	-80	84.185

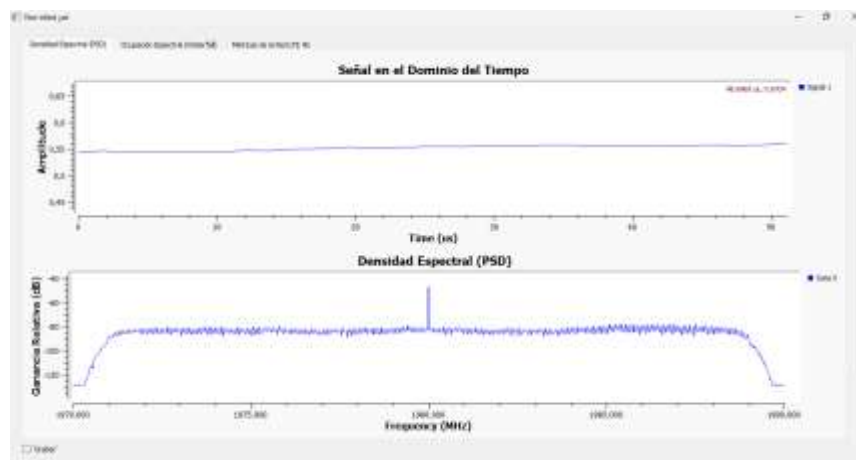
		Latitud: - 2.226786	8:13							
			26/07/2026 12:02	-78	-55	-93	-9	32	N/A	89.017
		Longitud: - 80.867757	26/07/2026 14:54	-50	-54	-82	-9	31	-90	91.093
P3	15	Latitud: - 2.227402	07/07/2026 12:45	-76	-72	-120	-8	21.1	-75	83.093
			26/07/2026 12:21	-75	-56	-84	-8	18	-122	78.456
		Longitud: - 80.86604	26/07/2026 14:58	-75	-56	-84	-8	18	-125	81.103

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 16 se observan las métricas obtenidas del eNodeB de la zona urbana obtenidas mediante el HackRF One y el programa de GNU Radio a distintas distancias, fechas y horas del nodo, es notable que ciertas variables los datos no varían y se mantienen constantes mientras que en otras variables los datos si varían. Esto puede deberse a que las mediciones no solo fueron realizadas a distintas distancias, sino que también varía la fecha y hora de las mediciones.

A continuación, se mostrarán visualmente los resultados de la señal en el dominio del tiempo, frecuencia y el espectrograma.

Figura 44: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona urbana, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 300 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:09

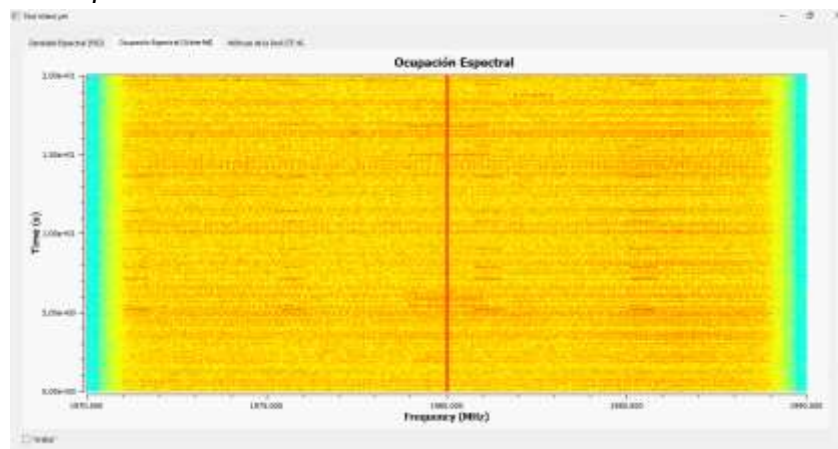


Nota. Elaboración propia.

En la parte superior de la figura 45 se observa la señal de la red LTE en el dominio del tiempo, En la parte inferior se presenta la densidad espectral de potencia, donde se aprecia un piso de ruido cercano a -80 dB y un pico espectral de 1980 MHz, con aproximadamente un nivel de -47 dB, que corresponde a la componente de mayor amplitud de la señal recibida. Los siguientes niveles a -124 dB corresponden al piso de ruido instrumental del SDR. Estos valores tienen estimaciones relativas obtenidas mediante GNU Radio y no mediciones absolutas de potencia. Dichos datos fueron capturados a una distancia de 300 metros del eNodeB.

Adicional, se debe considerar que los receptores SDR de bajo costo como el HackRF One pueden mostrar artefactos propios del hardware que no pertenecen a señales reales presentes en el entorno. Frecuentemente se puede observar un pico de energía ubicado en la frecuencia central configurada del receptor, el cual responde típicamente a un artefacto distinguido como DC offset o a una fuga del oscilador local (LO leakage). Este pico central debe ser identificado y excluido del análisis, dado que su presencia es autónoma de la actividad del análisis y se conserva constante en todas las capturas. Se lo debe tener únicamente en cuenta como referencia de la frecuencia central del espectro más no como alguna señal detectada.

Figura 45: Espectrograma de ocupación espectral a 300 metros de distancia del eNodeB de la zona urbana en la fecha del 21/07/2026 a las 8:09

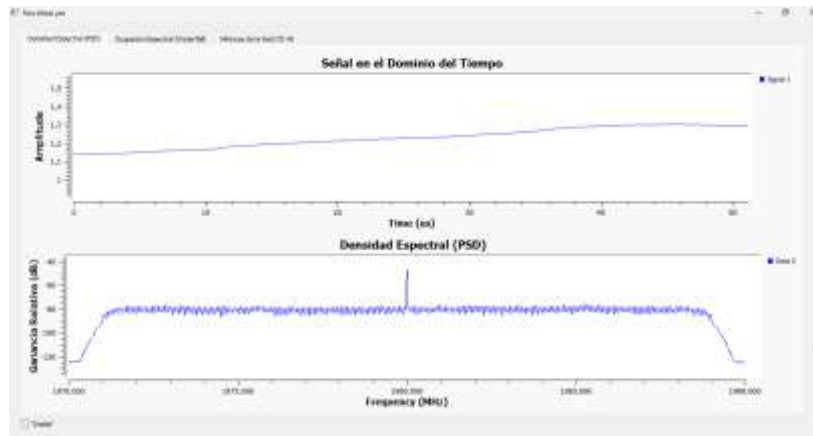


Nota. Elaboración propia.

El espectrograma mostrado en la figura 46 muestra la ocupación espectral de la portadora LTE en la banda AWS. La línea vertical de color rojo ubicada en el centro indica la frecuencia central de 1980 MHz. En los extremos derecho e izquierdo se observan franjas de

color turquesa, que evidencian ausencia de tráfico, mientras que por otro lado los colores amarillos y naranja como los colores cálidos muestran el tráfico que existe en la portadora desde los 1971 hasta los 1989 MHz.

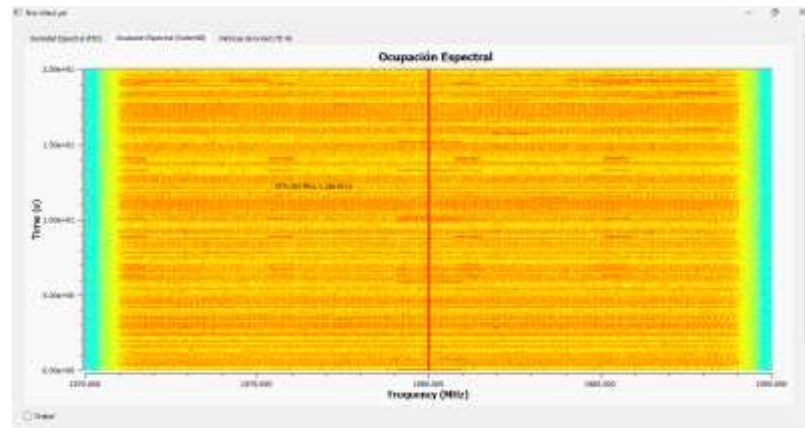
Figura 46: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona urbana, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 150 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:10.



Nota. Elaboración propia.

En la figura 47, la señal de la red LTE está en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. En la parte superior se aprecia cómo va aumentando la amplitud en una captura puntual, mientras que en la parte inferior se observa como la densidad espectral con un piso de ruido de -122 dB y un pico de señal de aproximadamente -75 dB, en la frecuencia central de 1980 MHz. Estos datos fueron obtenidos a una distancia de 150 metros del eNodeB.

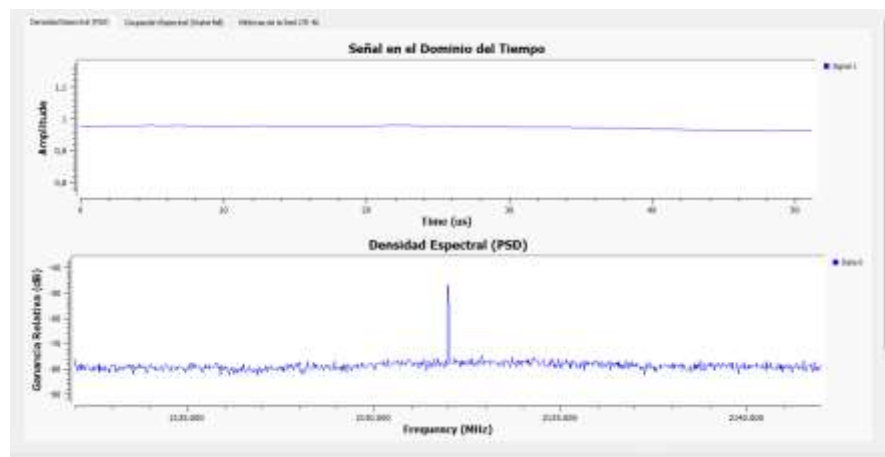
Figura 47: Espectrograma de ocupación espectral a 150 metros de distancia del eNodeB de la zona urbana en la fecha del 21/07/2026 a las 8:13



Nota. Elaboración propia.

En el espectrograma mostrado en la figura 48 se observan franjas verticales de color turquesa en los extremos derecho e izquierdo del espectrograma indican ausencia de tráfico. Sin embargo, se visualizan más franjas rojas que en la figura 47, lo que indica un incremento en el tráfico detectado al reducir la distancia de estimación de 300 metros a 150 metros.

Figura 48: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona urbana, banda 4 LTE (2110-2155 MHz) a 15 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 07/07/2026 a las 12:45

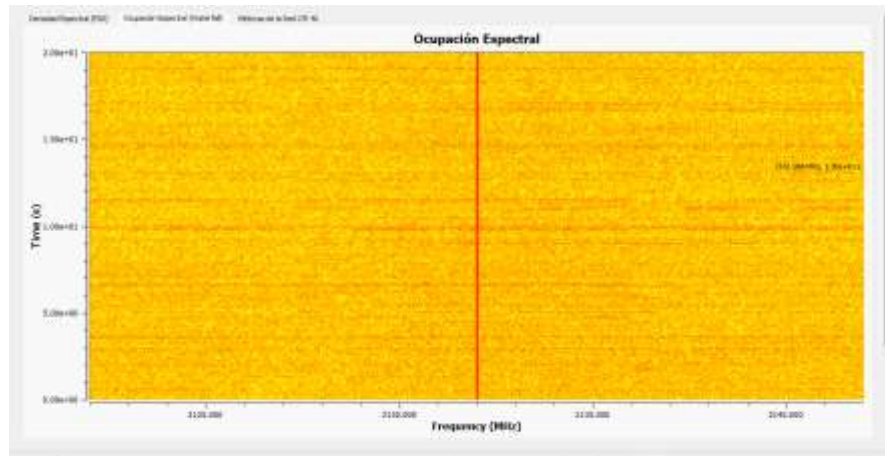


Nota. Elaboración propia.

En la figura 49, en la parte superior se observa la señal en el dominio del tiempo, mientras que en la parte inferior se observa la señal en el dominio de la frecuencia. En la parte superior se

observa la señal de manera estática por tratarse de una captura puntual. En la parte inferior se observa la densidad espectral, donde el pico central corresponde a 2132 MHz de frecuencia. Este cambio de frecuencia se debe a que, al acercarse a una distancia de 15 metros del eNodeB, lo que ocasionó que el dispositivo móvil se conectará a otra portadora, requiriendo ajustar la frecuencia central en GNU Radio para continuar con la comparativa.

Figura 49: Espectrograma de ocupación espectral a 15 metros de distancia del eNodeB de la zona urbana en la fecha del 07/07/2026 a las 12:45



Nota. Elaboración propia.

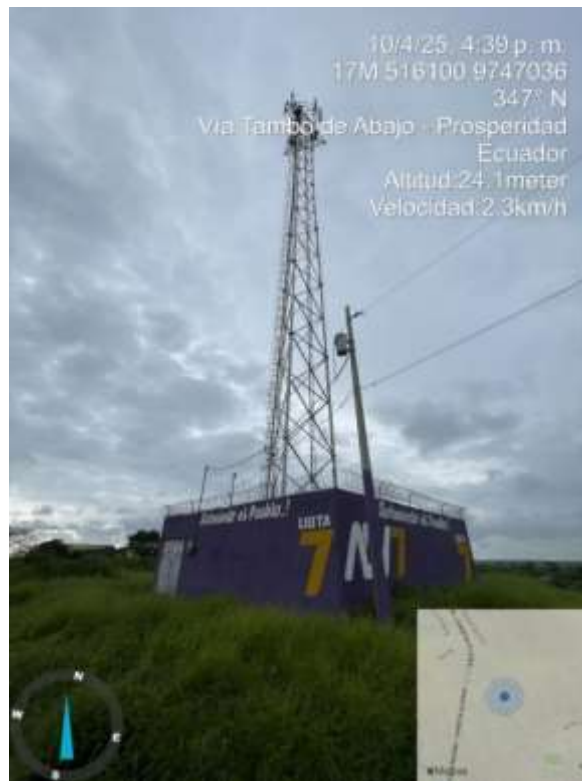
En la figura 50, se aprecia que en todo el espectrograma captado a 15 metros de distancia del eNodeB se observa tráfico de datos en todo el espectrograma, lo que confirma lo obtenido en la figura 49, donde el piso de ruido se encuentra al mismo nivel de la ganancia detectada. La frecuencia central de la portadora en esta imagen se indica en la línea roja indicada alrededor de 2130 MHz.

4.1.2 Zona rural

Ficha técnica de las mediciones

Se realizaron tres capturas en esta zona, a distancias crecientes respecto al eNodeB más cercano, con el fin de evaluar el efecto de la distancia y del patrón de radiación sobre los indicadores obtenidos. En la figura 51 se observa una fotografía del eNodeB seleccionado para la zona rural en la que se realizaron las mediciones

Figura 50: Fotografía del entorno zona rural



Nota. Elaboración propia.

Figura 51: Captura del mapa en Google Earth Pro con la ubicación de los tres puntos de medición y del eNodeB de referencia.



Nota. Elaboración propia.

En la figura 52 se observa una imagen satelital en la que se observa señalado con un marcador de color azul el eNodeB de la zona rural y de color rojo las distancias de 15 metros, 150 metros y 300 metros en la que se tomaron las muestras. Con el propósito de caracterizar el comportamiento de la señal LTE en los diferentes escenarios de evaluación, se estimaron diversos indicadores mediante GNU Radio y el dispositivo HackRF One. La Tabla 17 resume los valores obtenidos para cada punto de estimación, permitiendo analizar la calidad y potencia de la señal recibida.

Tabla 17: Indicadores obtenidos (GNU Radio/HackRF One) zona rural.

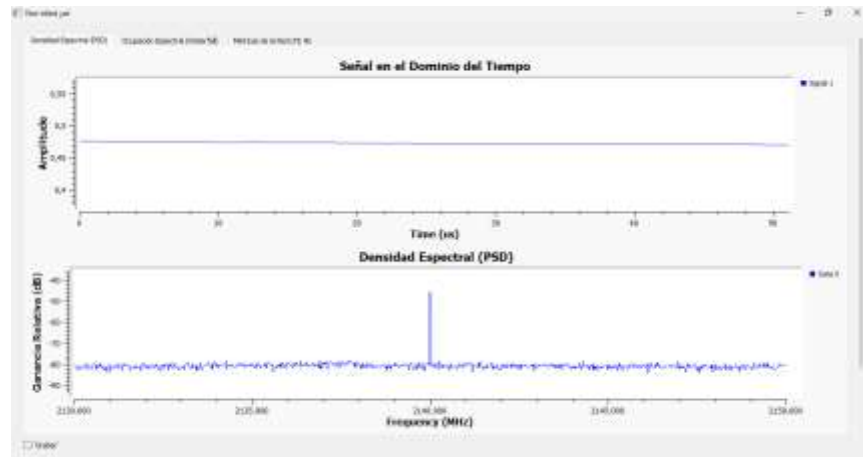
Punto	Distancia al eNodeB (m)	Coordenadas GPS	Fecha y hora	Piso de ruido de la señal útil(dB)	RSSI estimado (dBm)	RSRP estimado (dBm)	RSRQ estimado (dB)	SNR estimado (dB)	Piso de ruido instrumental (dBm)	Tasa de bajada estimada (Mbps)
P1	300	Latitud: - 2.289736 Longitud: - 80.854488	21/07/2026 9:31	-82	-79	-116	-15	8.6	-85	84
			26/07/2026 11:58	-75	-63	-86	-8	26	N/A	85.828
			26/07/2026 14:28	-80	-66	-92	-9	29	N/A	87.141
P2	150		21/07/2026	-78	-75	-108	-10	7.3	-88	82.961

		Latitud: - 2.289162	9:35							
			26/07/2026	-78	-55	-93	-9	32	N/A	89.017
		Longitud: - 80.854770	12:02							
			26/07/2026	-70	-64	-93	-8	31	N/A	86.854
P3	15	Latitud: - 2.288652	14:31							
			07/07/2026	-46	-55	-74	-8	26	-60	84.618
		Longitud: - 80.855337	12:19							
			26/07/2026	-56	-53	-73	-8	12	N/A	106.686
			12:06							
			26/07/2026	-65	-61	-91	-9	21	N/A	84.151
			14:35							

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 17 se observan las métricas obtenidas del eNodeB de la zona rural mediante el HackRF One y el programa GNU Radio a diferentes distancias del nodo de transmisión. Se evidencia que algunos indicadores presentan variaciones significativas entre los puntos de estimación, especialmente el RSSI, RSRP, RSRQ, SNR y el piso de ruido, reflejando una mejora en la calidad de la señal a medida que reduce la distancia al eNodeB. Por otra parte, la tasa de bajada estimada se mantiene relativamente estable entre las mediciones. Visualmente, los resultados se muestran a continuación mediante gráficos para facilitar su análisis.

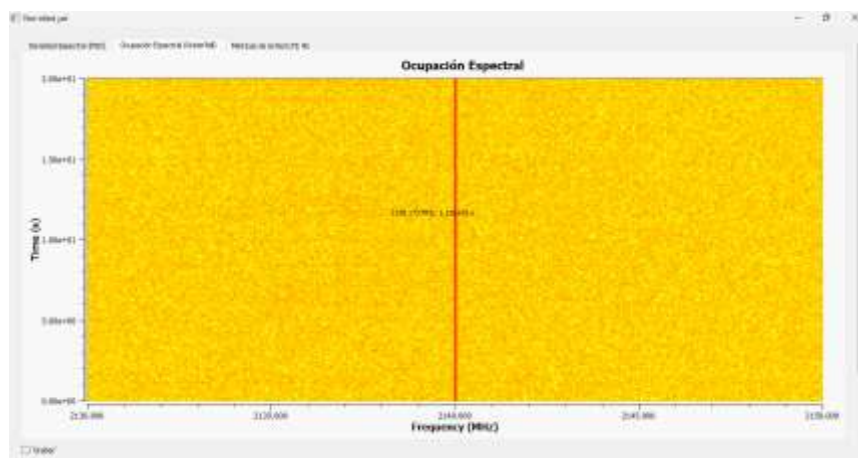
Figura 52: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona rural, banda 4 LTE (2125-2140 MHz) a 300 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 9:31



Nota. Elaboración propia.

En la zona rural a 300 metros de distancia del eNodeB se detectó la portadora L4 en la aplicación móvil. En la parte inferior de la figura 53 se observa que la densidad espectral, donde el pico de la frecuencia central es de 2140 MHz. El piso de ruido se encuentra muy cercano a la ganancia detectada, reflejando una menor relación señal/ruido en esta condición de distancia.

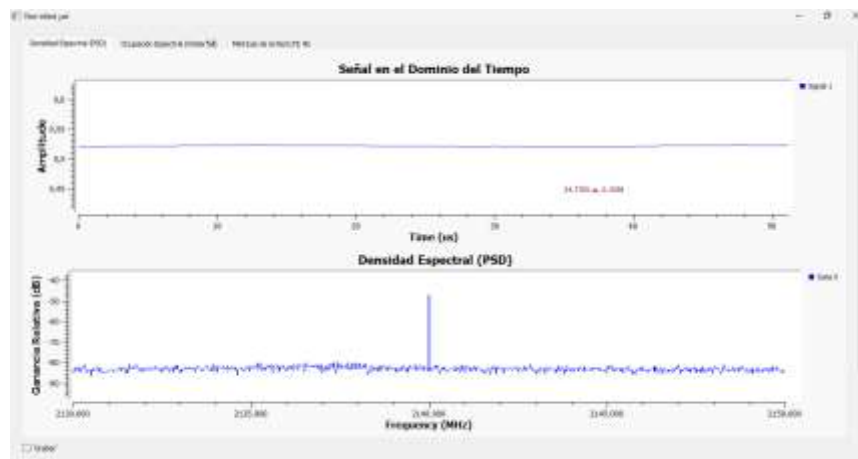
Figura 53: Espectrograma de ocupación espectral a 300 metros de distancia del eNodeB de la zona rural en la fecha del 21/07/2026 a las 9:31



Nota. Elaboración propia.

En la figura 54, el espectrograma evidencia una captura de tráfico detectado en todo el espectro. Se visualiza una gran cantidad de muestras amarillas y pocas naranjas, lo que indica que la intensidad del tráfico no es alta. Este comportamiento puede deberse a que el piso de ruido se encuentra cercano al nivel de ganancia, generando pérdidas de datos por una menor relación señal/ruido.

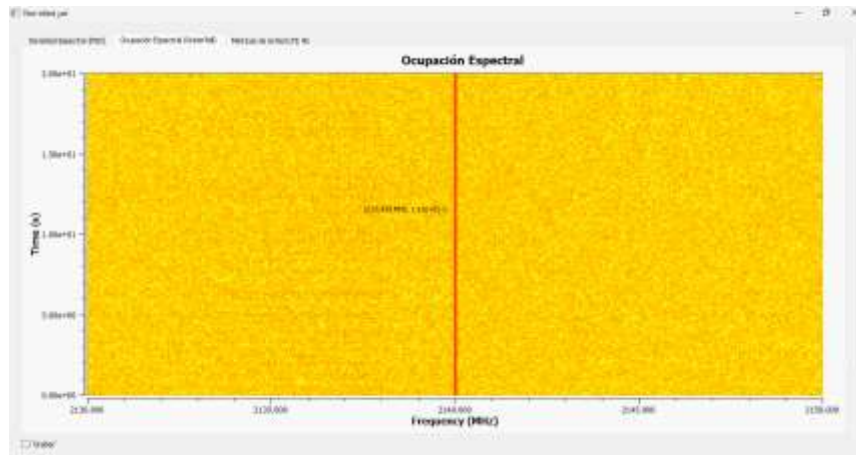
Figura 54: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona rural, banda 4 LTE (2125-2140 MHz) a 150 metros de distancia del eNodeB 21/07/2026 a las 9:35



Nota. Elaboración propia.

En la figura 55 se observa la señal LTE en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. La densidad espectral muestra que el piso de ruido se localiza muy cercano a la ganancia total, lo que genera un valor bajo de la SNR. La frecuencia central de la portadora se mantiene alrededor de 2140 MHz.

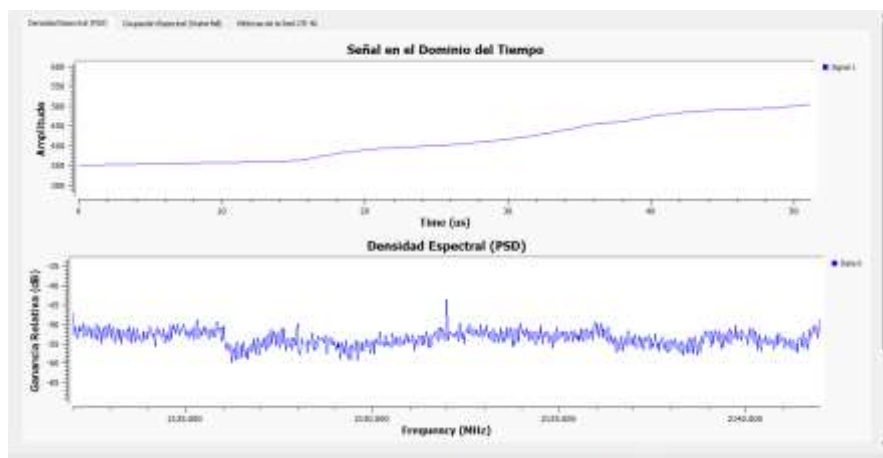
Figura 55: Espectrograma de ocupación espectral a 150 metros de distancia del eNodeB de la zona rural 21/07/2026 a las 9:35



Nota. Elaboración propia.

De igual forma, el espectrograma de la figura 56 presenta datos similares a los del espectrograma de la figura 54, con la diferencia de que se observa un ligero aumento en los tonos naranjas. ligeramente tonos naranjas. Esto indica un incremento moderado en el tráfico detectado a 150 metros del eNodeB, en comparación de la estimación realizada a la distancia de 300 metros.

Figura 56: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona rural, banda 4 LTE (2125-2140 MHz) a 15 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 07/07/2026 a las 12:19

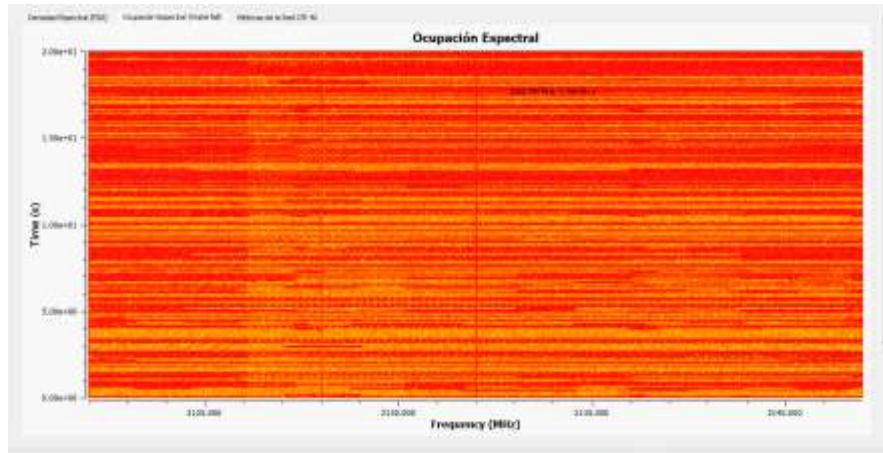


Nota. Elaboración propia.

A pesar de ser una captura de pantalla, en la figura 57 de igual manera en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. En la parte superior es notable el cambio de amplitud en

la captura puntual, mientras que en la parte inferior se evidencia la densidad espectral con un pico central en 2132 MHz. Este cambio de frecuencia se produce cerca de los 15 metros de distancia del eNodeB, lo que causa que el dispositivo móvil cambiado se conectara a otra portadora, requiriendo ajustar la frecuencia central en GNU Radio para continuar con la comparativa.

Figura 57: Espectrograma de ocupación espectral a 15 metros de distancia del eNodeB de la zona rural en la fecha del 07/07/2026 a las 12:10.



Nota. Elaboración propia.

La figura 58 evidencia un espectrograma capturado a 15 metros del eNodeB, donde se observa aumento de tráfico y ganancia respecto. La gran cantidad de franjas naranjas refleja una mayor ocupación espectral, confirmando que la frecuencia central de la portadora es alrededor de 2132 MHz.

4.1.3 Zona costera

Ficha técnica de las mediciones

Se realizaron tres capturas en esta zona, a distancias crecientes respecto al eNodeB más cercano, con el fin de evaluar el efecto de la distancia y del patrón de radiación sobre los indicadores obtenidos. En la figura 59 se observa una fotografía del eNodeB seleccionado para la zona costera en la que se realizaron las mediciones.

Figura 58: Fotografía del entorno zona costera



Nota. Elaboración propia.

Figura 59: Captura del mapa en Google Earth Pro con la ubicación de los tres puntos y del eNodeB de la zona costera.



Nota. Elaboración propia.

En la figura 60 se observa una imagen satelital en la que se observa señalado con un marcador de color azul el eNodeB de la zona costera y de color rojo las distancias de 15 metros, 150 metros y 300 metros en la que se tomaron las muestras. Con el propósito de caracterizar el comportamiento de la señal LTE en los diferentes escenarios de evaluación, se estimaron diversos indicadores mediante GNU Radio y el dispositivo HackRF One. La tabla 18 resume los valores obtenidos para cada punto de estimación, permitiendo analizar la calidad y potencia de la señal recibida.

Tabla 18: Indicadores obtenidos (GNU Radio/HackRF).

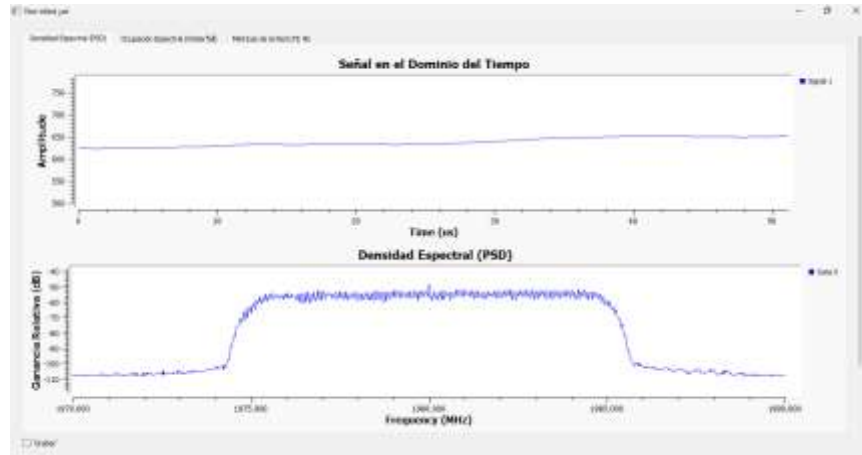
Punto	Distancia al eNodeB (m)	Coordenadas GPS	Fecha y hora	Piso de ruido de la señal útil(dB)	RSSI estimado (dBm)	RSRP estimado (dBm)	RSRQ estimado (dB)	SNR estimado (dB)	Piso de ruido Instrumental (dBm)	Tasa de bajada estimada (Mbps)
P1	300	Latitud: - 2.206368 Longitud: - 80.87559	21/07/2026 8:38	-54	-74	-92	-8	16	-108	84.285
			26/07/2026 11:04	-80	-61	-83	-6	32	-123	89.633
			26/07/2026 14:02	-75	-63	-88	-7	29	-120	80.487
P2	150	Latitud: - 2.208416 Longitud: - 80.87827	21/07/2026 8:28	-55	-68	-96	-9	12	-110	79.997
			26/07/2026 10:57	-84	-71	-93	-7	27	-130	82.160
			26/07/2026 14: 07	-65	-55	-84	-8	26	-105	92.222

Nota. Elaboración propia.

P3	15	Latitud: - 2.208467 Longitud: - 80.87688	07/07/2026 10:43	-52	-52	-76	-8	24	-105	70.413
			26/07/2026 10:52	-78	-54	-86	-9	11	-124	93.690
			26/07/2026 14:13	-56	-54	-83	-9	31	-110	78.294

En la tabla 18 se observan las métricas obtenidas del eNodeB de la zona costera mediante el HackRF One y el programa GNU Radio a distintas distancias del nodo de transmisión. Se evidencia que los indicadores presentan variaciones entre los puntos de estimación, destacándose una mejora en el RSSI, RSRP y SNR en el punto más cercano al eNodeB. De igual manera, el RSRQ se mantiene con ligeras variaciones, mientras que el piso de ruido y la tasa de bajada estimada muestran diferencias moderadas entre las mediciones. Visualmente, los resultados se presentan a continuación mediante gráficos para facilitar su análisis.

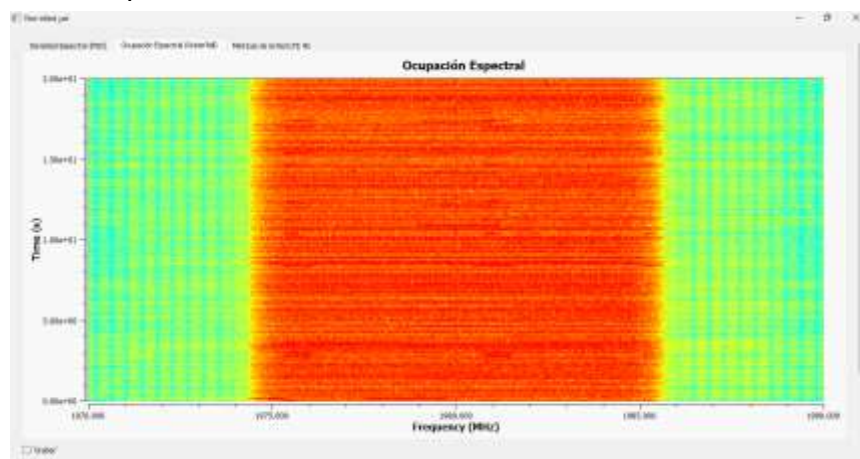
Figura 60: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona costera, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 300 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:38



Nota. Elaboración propia.

En la figura 61 se observa la señal LTE en la banda L2 en el dominio del tiempo en la parte superior y en el dominio de la frecuencia en la parte inferior. En la parte superior se aprecia un ligero cambio de amplitud de la señal, mientras que en la parte inferior se ve claramente una diferencia entre ganancia total y piso de ruido, con ligeros picos en los extremos donde este se hace más notorio o pronunciado.

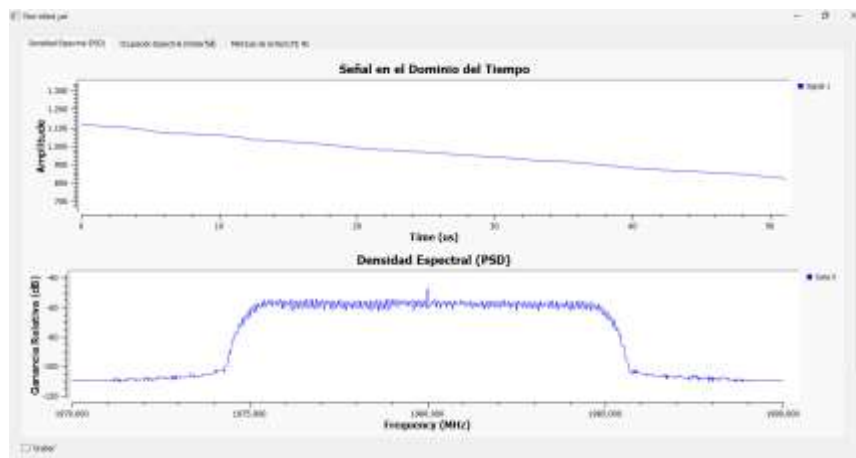
Figura 61: Espectrograma de ocupación espectral a 300 metros de distancia del eNodeB de la zona costera en la fecha del 21/07/2026 a las 8:38.



Nota. Elaboración propia.

El espectrograma de la figura 62 evidencia la ocupación del espectro de la portadora LTE, evidenciando una intensidad de franjas naranjas entre 1974.5 MHz hasta los 1985.5 MHz, lo que indica un alto tráfico en ese ancho de banda. En los extremos de la captura se observan ligeras marcas amarillas, proporcionados de pequeños picos cercanos al piso de ruido de la señal.

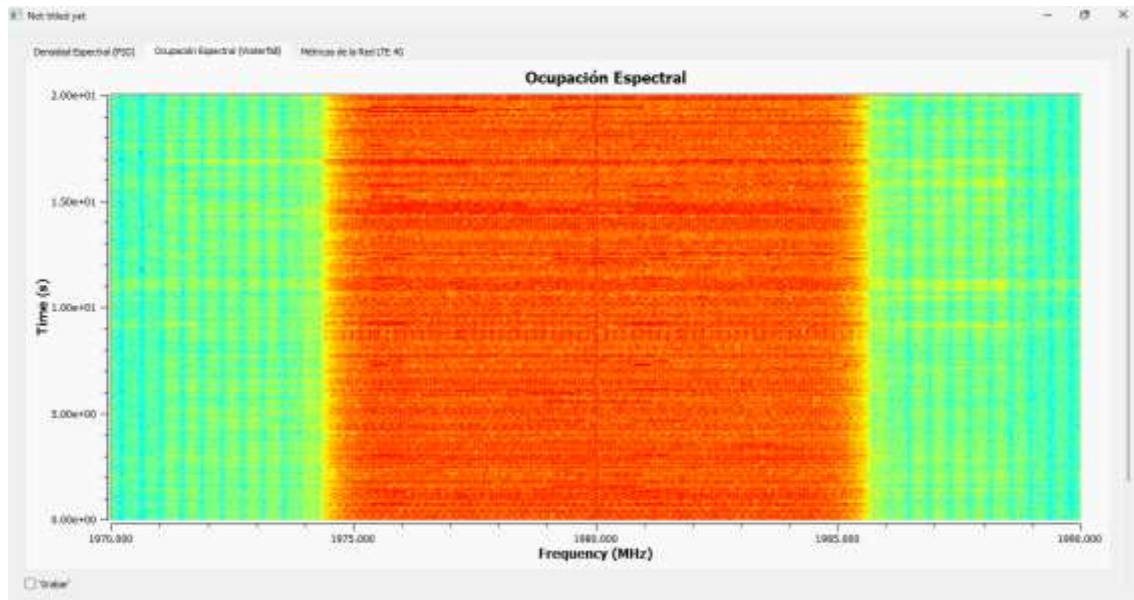
Figura 62: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona costera, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 150 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:28



Nota. Elaboración propia.

La figura 63 muestra la señal LTE en el dominio del tiempo, así como también la muestra en el dominio de la frecuencia. En la parte superior se visualiza una caída de amplitud, la cual corresponde a un cambio continuo que no se refleja por completo en la captura de pantalla. En la parte inferior se visualiza la densidad espectral, con una ganancia central de -50 dB y un piso de ruido cercano a -110 dB en los extremos, además de ligeros picos próximos al piso de ruido.

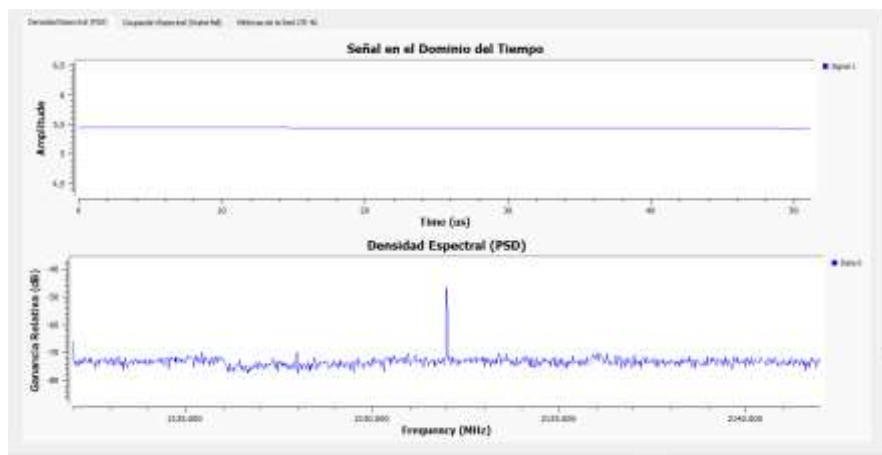
Figura 63: Espectrograma de ocupación espectral a 150 metros de distancia del eNodeB de la zona costera en la fecha del 21/07/2026 a las 8:28



Nota. Elaboración propia.

En la figura 64, se visualiza que a partir de los 1974.5 MHz hasta los 1985.5 MHz en el espectrograma existe tráfico en la señal LTE manteniendo una gran cantidad de franjas naranjas. En los extremos se observa un fondo turquesa con pequeñas franjas amarillas, reflejando picos cercanos al piso de ruido de la señal.

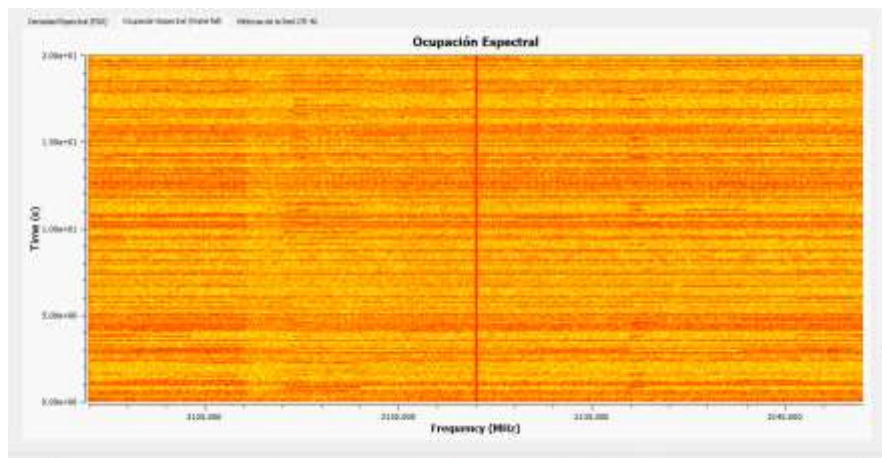
Figura 64: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona costera, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 15 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 07/07/2026 a las 10:43



Nota. Elaboración propia.

En la figura 65, se observa la señal en el dominio del tiempo de la red LTE. En la parte superior se visualiza una captura que pareciera ser casi constante debido a que la variación de amplitud no fue pronunciada. En la parte inferior muestra la densidad espectral donde la ganancia total se encuentra muy cerca al piso de ruido, dejando en evidencia una baja relación señal/ruido.

Figura 65: Espectrograma de ocupación espectral a 15 metros de distancia del eNodeB de la zona costera en la fecha del 07/07/2026 a las 10:43



Nota. Elaboración propia.

En el espectrograma se muestra la figura 66, la cual refleja que en la ganancia se mantiene cerca del piso de ruido. De igual manera se observa un incremento de franjas amarillas, lo que indica la baja diferencia en dB entre piso de ruido y la ganancia total encontrada. La frecuencia central de la portadora se mantiene activa durante el intervalo de tiempo analizado.

4.1.4 Zona montañosa

Ficha técnica de las mediciones

Se realizaron tres capturas en esta zona, a distancias crecientes respecto al eNodeB más cercano, con el fin de evaluar el efecto de la distancia y del patrón de radiación sobre los indicadores obtenidos. En la figura 54 se observa una fotografía del entorno en el que se encuentra una gran cantidad eNodeB's, esto se debe a que la zona montañosa escogida para este estudio es un punto estratégico utilizado por las empresas de telecomunicaciones para colocar sus torres ya

que el cerro Capaes de Santa Elena obstaculiza la visión de los eNodeB entre la parte céntrica de Santa Elena y la zona de la Ruta del Spondylus, es por esta razón que en vez de ver como obstáculo a este cerro fue utilizado como punto estratégico para la instalación de las torres de telecomunicaciones y así mantener la conexión en la provincia de Santa Elena.

Figura 66: Fotografía del entorno zona montañosa



Nota. Elaboración propia.

Figura 67: Captura del mapa en Google Earth Pro con la ubicación de los tres puntos de medición y del eNodeB de referencia



Nota. Elaboración propia.

En la figura 68 se observa una imagen satelital en la que se observa señalado con un marcador de color azul el eNodeB de la zona montañosa y de color rojo las distancias de 15 metros, 150 metros y 300 metros en la que se tomaron las muestras. Con el propósito de caracterizar el comportamiento de la señal LTE en los diferentes escenarios de evaluación, se estimaron diversos indicadores mediante GNU Radio y el dispositivo HackRF One. La tabla siguiente resume los valores obtenidos para cada punto de estimación, permitiendo analizar la calidad y potencia de la señal recibida.

Tabla 19: Indicadores obtenidos (GNU Radio/HackRF One)

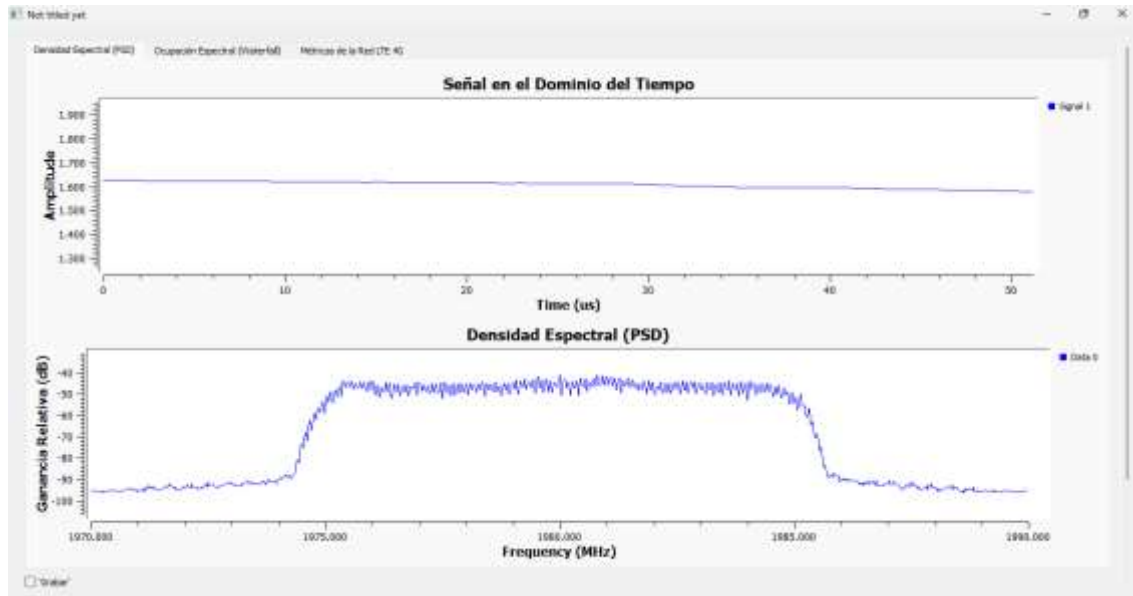
Punto	Distancia al eNodeB (m)	Coordenadas GPS	Fecha y hora	Piso de ruido de la señal útil(dB)	RSSI estimado (dBm)	RSRP estimado (dBm)	RSRQ estimado (dB)	SNR estimado (dB)	Piso de ruido Instrumental (dBm)	Tasa de bajada estimada (Mbps)
P1	300	Latitud: - 2.211346 Longitud: - 80.86075	21/07/2026 8:46	-40	-52	-72	-9	24	-95	79.083
			26/07/2026 11:14	-50	-54	-84	-9	26	-110	64.168
			26/07/2026 13:38 PM	-45	-55	-82	-7	22	-100	73.921
P2	150	Latitud: - 2.210080 Longitud: - 80.86084	21/07/2026 8:51	-38	-51	-64	-10	28	-92	73.512
			26/07/2026 11:21	-37	-63	-78	-6	21	-90	82.137
			26/07/2026 13:45	-40	-53	-85	-9	24	-98	86.845
P3	15		07/07/2026	-22	-54	-87	-9	15	-42	77.202

		Latitud: -	11:20							
		2.209051	26/07/2026	-35	-62	-96	-17	8	-85	73.046
		Longitud: -	11:25							
		80.86172	26/07/2026	-40	-51	-80	-11	13	-100	70.619
			13:50							

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 19 se muestran las métricas obtenidas del eNodeB de la zona montañosa mediante el HackRF One y el programa GNU Radio a distintas distancias del nodo de transmisión. Se prueba que los indicadores presentan variaciones entre los puntos de medición, observándose mejores valores de RSRP y SNR en el punto intermedio, mientras que el RSSI y el RSRQ muestran cambios poco significativos. De igual manera, el piso de ruido y la tasa de bajada estimada presentan oposiciones entre las mediciones, lo que puede atribuirse a las condiciones propias del entorno y a la ubicación de cada punto respecto al eNodeB. Visualmente, los resultados se muestran a continuación mediante gráficos para proporcionar su análisis.

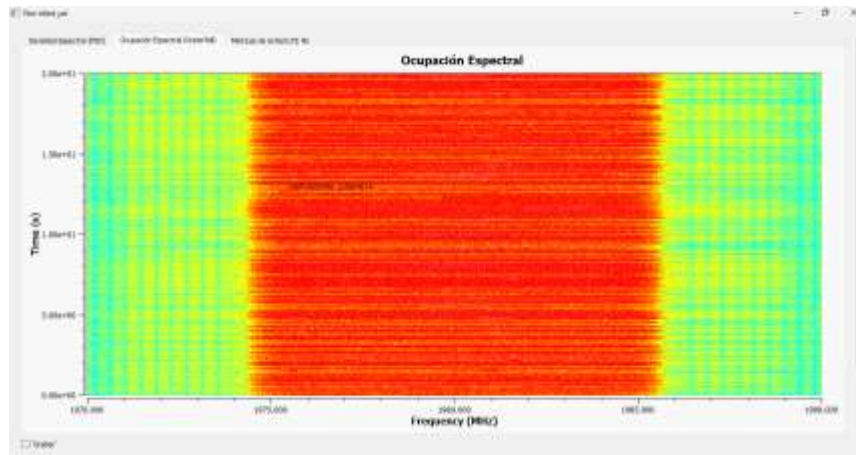
Figura 68: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona montañosa, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 300 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:46



Nota. Elaboración propia.

La figura 69 muestra la señal LTE en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. En la parte inferior se observa la densidad espectral, con un piso de ruido cercano a -95 dB y pequeños picos detectados en los extremos. De igual manera también se muestra que en la parte superior se aprecia un pequeño descenso de amplitud, lo que refleja una variación ligera que no se visualiza de forma continua en la captura. Entre 1974.5 MHz y 1985.5 MHz se visualiza un aumento de ganancia que logra aproximadamente -40 dB.

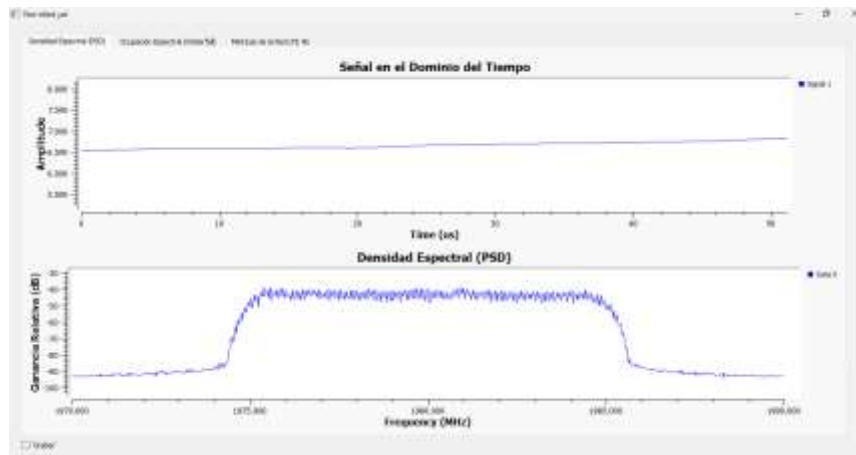
Figura 69: Espectrograma de ocupación espectral a 300 metros de distancia del eNodeB de la zona montañosa en la fecha del 21/07/2026 a las 8:46



Nota. Elaboración propia.

En el espectrograma de la figura 70 se observa la ocupación espectral de la portadora LTE, con franjas rojas entre 1974.5 MHz y 2185.5 MHz que reflejan un alto tráfico de datos. En los extremos se visualizan pequeñas franjas amarillas, asociadas a picos cercanos al piso de ruido de la señal

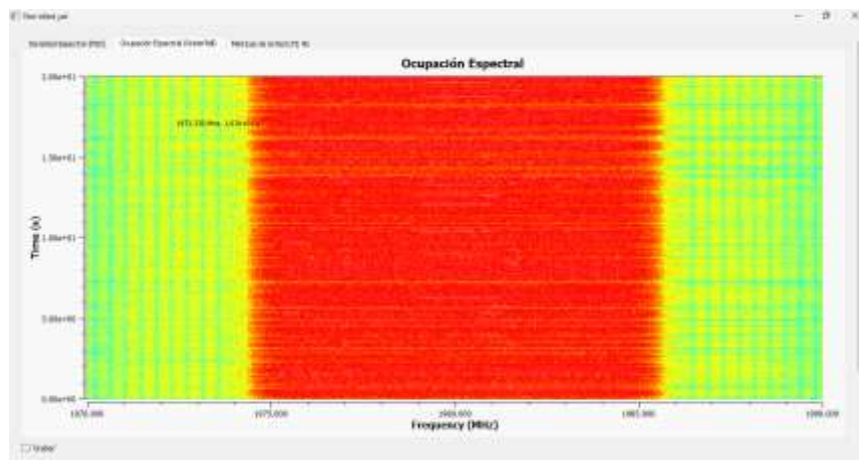
Figura 70: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona montañosa, banda 2 LTE (1930-1990 MHz) a 150 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 21/07/2026 a las 8:51



Nota. Elaboración propia.

La señal LTE en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia de la figura 71 muestra que en la parte superior se aprecia un ligero aumento de amplitud, aunque la señal presenta un cambio constante que no se refleja completamente en la captura. En la parte inferior se observa la densidad espectral, con un piso de ruido cercano a -90 dB y pequeños picos en los extremos. Entre 1974.5 MHz y 1985.5 MHz se visualiza un aumento de ganancia que logra aproximadamente -40 dB.

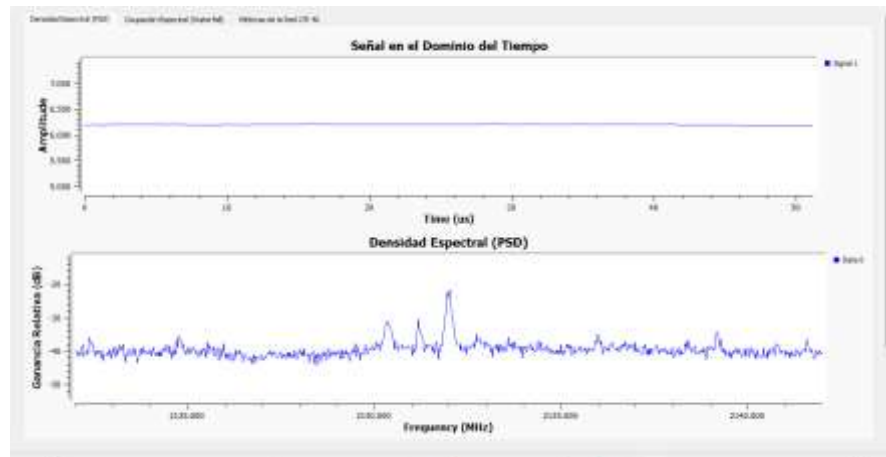
Figura 71: Espectrograma de ocupación espectral a 150 metros de distancia del eNodeB de la zona montañosa en la fecha del 21/07/2026 a las 8:51



Nota. Elaboración propia.

La figura 72 muestra la ocupación espectral de la portadora LTE, donde se visualiza un incremento en la intensidad de las franjas centrales de color naranja y un ligero aumento en las franjas laterales de color amarillo, proporcionados a picos cercanos al piso de ruido. Este procedimiento puede deberse al cambio de distancia de 300 m a 150 m del eNodeB.

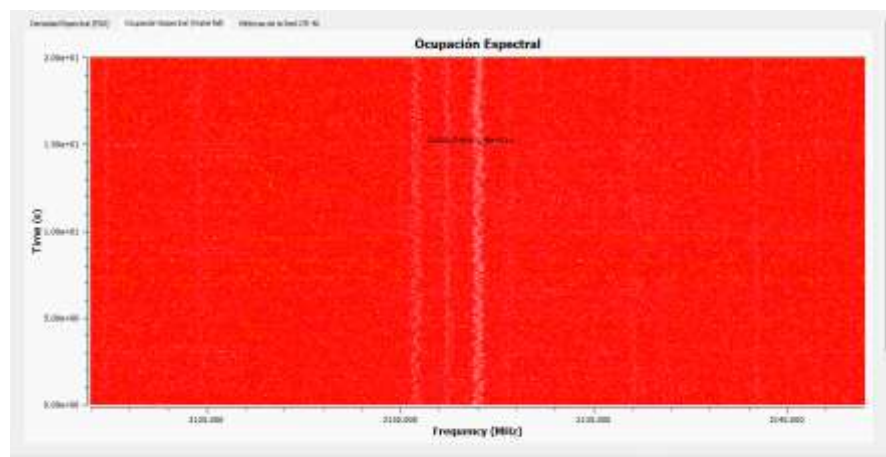
Figura 72: Densidad espectral de potencia (PSD) registrada en la zona montañosa, banda 4 LTE (2110-2155 MHz) a 15 metros de distancia del eNodeB en la fecha del 07/07/2026 a las 11:20



Nota. Elaboración propia.

En la figura 73, la señal LTE en el dominio del tiempo parece casi constante, no obstante, en el dominio de la frecuencia la señal LTE presenta un piso de ruido muy elevado cercano a los -40 dB y varios picos con ganancias de hasta casi los -20 dB, esto se debe a que en la zona se encuentra una gran cantidad de eNodeB, estos se encuentran operando en distintas portadoras de la red LTE y es justo lo que se detecta con el HackRF One al estar a una distancia de 15 metros y se observa mediante el programa de GNU Radio.

Figura 73: Espectrograma de ocupación espectral a 15 metros de distancia del eNodeB de la zona montañosa en la fecha del 07/07/2026 a las 11:20.



Nota. Elaboración propia.

En el espectrograma mostrado en la figura 74, se observa que todo el espectro se encuentra con un color rojo intenso, esto refleja tanto el tráfico de las portadoras y la ganancia mostrada en la figura 76 de la señal LTE en el dominio del tiempo, esto puede generar ensanchamientos entre las portadoras generando intermitencias y problemas en la red LTE.

4.2 Resultados obtenidos con G-NetTrack Lite

Con el propósito de complementar el análisis realizado en los resultados anteriores, esta sección presenta tablas de indicadores o mediciones realizadas en las cuatro zonas de estudio (urbana, rural, costera y montañosa) en función de los parámetros técnicos conseguidos con el G-NetTrack Lite.

4.2.1 Indicadores de cobertura zona urbana (G-NetTrack Lite)

Tabla 20: Mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona urbana

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 20 se presentan las métricas obtenidas mediante G-NetTrack Lite en la zona urbana a diferentes distancias, fechas y horas del eNodeB. Se observa una mejora en los valores de RSSI, RSRP y SNR a medida que disminuye la distancia al nodo de transmisión, mientras que el RSRQ presenta ligeras variaciones. Además, se muestran en la tabla 21 capturas de los puntos medidos a 300 m, 150 m y 15 m del eNodeB con sus respectivas fechas y horas de medición.

Tabla 21: Captura de las mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona urbana

Punto	Distancia al eNodeB (m)	Coordenadas GPS	Fecha y hora	RSSI leído (dBm)	RSRP leído (dBm)	RSRQ leído (dB)	SNR leído (dB)
P1	300	Latitud: - 2.226724 Longitud: - 80.869050	21/07/2026 8:09	-71	-98	-10	10
			26/07/2026 12:32	-51	-76	-7	27
			26/07/2026 14:56	-57	-83	-8	15
P2	150	Latitud: - 2.226786 Longitud: - 80.867757	21/07/2026 8:13	-67	-94	-8	8
			26/07/2026 12:26	-51	-58	-7	22
			26/07/2026 14:53	-51	-67	-8	29
P3	15	Latitud: - 2.227402 Longitud: - 80.86604	07/07/2026 12:45	-54	-87	-9	29
			26/07/2026 12:21	-51	-81	-11	14
			26/07/2026 14:49	-51	-75	-8	15

 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 13 PCI: 359 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -98 RSRQ: -10 SNR: 10.0 Longitud: -80.87656 Latitud: -2.227409 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Altitud: 38m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 13 PCI: 359 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -94 RSRQ: -8 SNR: 6.0 Longitud: -80.87644 Latitud: -2.227409 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Altitud: 38m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51552 CID: 2 PCI: 61 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -88 RSRQ: -10 SNR: 19.0 Longitud: -80.86664 Latitud: -2.227409 Velocidad: 0 km/h Dirección: 267° W Altitud: 53m
21/07/2026 - 8:09	21/07/2026 - 8:13	07/07/2026 - 12:45
 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51552 CID: 13 PCI: 60 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -76 RSRQ: -7 SNR: 27.0 Longitud: -80.86886 Latitud: -2.226693 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Altitud: 47m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51552 CID: 13 PCI: 60 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -58 RSRQ: -7 SNR: 22.0 Longitud: -80.86787 Latitud: -2.226767 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Altitud: 50m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51552 CID: 12 PCI: 61 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -81 RSRQ: -11 SNR: 14.0 Longitud: -80.86664 Latitud: -2.227409 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Altitud: 53m
26/07/2026 - 12:32	26/07/2026 - 12:26	26/07/2026 - 12:21
 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51552 CID: 13 PCI: 60 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -83 RSRQ: -8 SNR: 15.0 Longitud: -80.87119 Latitud: -2.226658 Velocidad: 33 km/h Dirección: 268° W Altitud: 48m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51552 CID: 13 PCI: 60 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -67 RSRQ: -8 SNR: 29.0 Longitud: -80.86885 Latitud: -2.226714 Velocidad: 3 km/h Dirección: 294° NW Altitud: 47m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51552 CID: 12 PCI: 61 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -75 RSRQ: -8 SNR: 15.0 Longitud: -80.86639 Latitud: -2.227430 Velocidad: 1 km/h Dirección: 287° W Altitud: 56m
26/07/2026 - 14:56	26/07/2026 - 14:53	26/07/2026 - 14:49
Captura de datos a 300 metros de distancia del eNodeB	Captura de datos a 150 metros de distancia del eNodeB	Captura de datos a 15 metros de distancia del eNodeB

4.2.2 Indicadores de cobertura zona rural (G-NetTrack Lite)

Tabla 22: Mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona rural.

Nota. Elaboración propia.

Punto	Distancia al eNodeB (m)	Coordenadas GPS	Fecha y hora	RSSI leído (dBm)	RSRP leído (dBm)	RSRQ leído (dB)	SNR leído (dB)
P1	300	Latitud: -2.289736 Longitud: -80.854488	21/07/2026 9:31	-79	-111	-11	8
			26/07/2026 11:58	-55	-82	-6	22
			26/07/2026 14:28	-61	-86	-5	25
P2	150	Latitud: -2.289162 Longitud: -80.854770	21/07/2026 9:35	-75	-107	-10	8
			26/07/2026 12:02	-63	-79	-6	27
			26/07/2026 14:31	-61	-86	-6	27
P3	15	Latitud: -2.288652 Longitud: -80.855337	07/07/2026 12:19	-67	-94	-8	8
			26/07/2026 12:06	-51	-76	-7	9
			26/07/2026 14:35	-59	-87	-7	19

En la tabla 22 se presentan las métricas obtenidas mediante G-NetTrack Lite en la zona rural a diferentes distancias del eNodeB. Se observa que los valores de RSSI y RSRP mejoran conforme disminuye la distancia al nodo de transmisión, mientras que el RSRQ presenta una ligera mejora y el SNR se mantiene constante en todos los puntos de medición. En la siguiente tabla 23 se muestran capturas de datos obtenidas mediante G-NetTrack Lite a 300 m, 150 m y 15 m del eNodeB, junto con sus respectivas fechas y horas de medición en la zona rural.

Tabla 23: Captura de las mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona rural

 G-NetTrack Lite Operador: Claro MCC: 740 MNC: 01 TAC: 60184 eNB: 201163 CID: 11 PCI: 381 ARFCN: 2250 BAND: L4 BV F DL: 2140,0 MHz F UL: 2140,0 MHz RSRP: -111 RSRQ: -11 SNR: 8.0 CQI: 1 Longitud: -- Latitud: -- Velocidad: -- Dirección: -- Alto: -- Altitud: -- Nivel: --	 G-NetTrack Lite Operador: Claro MCC: 740 MNC: 01 TAC: 60184 eNB: 201163 CID: 11 PCI: 381 ARFCN: 2250 BAND: L4 BV F DL: 2140,0 MHz F UL: 2140,0 MHz RSRP: -107 RSRQ: -10 SNR: 8.0 CQI: 1 Longitud: -- Latitud: -- Velocidad: -- Dirección: -- Alto: -- Altitud: -- Nivel: --	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51689 CID: 1 PCI: 353 ARFCN: 2050 BAND: L4 BV F DL: 2120,0 MHz F UL: 2120,0 MHz RSRP: -80 RSRQ: -6 SNR: 29.0 CQI: 1 Longitud: -80.85762 Latitud: -2.28 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 33m Altitud: 33m Nivel: N
21/07/2026 - 9:31	21/07/2026 - 9:35	07/07/2026 - 12:19
 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51689 CID: 8 PCI: 33 ARFCN: 9585 BAND: L28 BV F DL: 795,5 MHz F UL: 795,5 MHz RSRP: -82 RSRQ: -6 SNR: 22.0 CQI: 1 Longitud: -80.85467 Latitud: -2.28 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 36m Altitud: 36m Nivel: N	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51689 CID: 8 PCI: 33 ARFCN: 9585 BAND: L28 BV F DL: 795,5 MHz F UL: 795,5 MHz RSRP: -79 RSRQ: -6 SNR: 27.0 CQI: 1 Longitud: -80.85467 Latitud: -2.28 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 36m Altitud: 36m Nivel: N	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51689 CID: 9 PCI: 239 ARFCN: 9585 BAND: L28 BV F DL: 795,5 MHz F UL: 795,5 MHz RSRP: -76 RSRQ: -7 SNR: 9.0 CQI: 1 Longitud: -80.85532 Latitud: -2.28 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 37m Altitud: 37m Nivel: N
26/07/2026 - 11:58	26/07/2026 - 12:02	26/07/2026 - 12:06

 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51689 CID: 2 PCI: 327 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -86 RSRQ: -5 SNR: 25.0 Longitud: -80.85417 Latitud: -2.29 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Altitud: 38m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51689 CID: 2 PCI: 327 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -86 RSRQ: -6 SNR: 27.0 Longitud: -80.85482 Latitud: -2.28 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Altitud: 40m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51689 CID: 3 PCI: 58 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -87 RSRQ: -7 SNR: 19.0 Longitud: -80.85533 Latitud: -2.28 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Altitud: 41m
26/07/2026 - 14:28	26/07/2026 - 14:31	26/07/2026 - 14:35
Captura de datos a 300 metros de distancia del eNodeB	Captura de datos a 150 metros de distancia del eNodeB	Captura de datos a 15 metros de distancia del eNodeB

Nota. Elaboración propia.

4.2.3 Indicadores de cobertura zona costera (G-NetTrack Lite)

Tabla 24: Mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona costera

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 24 se presentan las métricas obtenidas mediante G-NetTrack Lite en la zona

Punto	Distancia al eNodeB (m)	Coordenadas GPS	Fecha y hora	RSSI leído (dBm)	RSRP leído (dBm)	RSRQ leído (dB)	SNR leído (dB)
P1	300	Latitud: -2.206368 Longitud: -80.87559	21/07/2026 8:38	-71	-96	-8	14
			26/07/2026 11:04	-55	-78	-3	29
			26/07/2026 14:02	-59	-85	-4	26
P2	150	Latitud: -2.208416 Longitud: -80.87827	21/07/2026 8:28	-63	-88	-8	22
			26/07/2026 10:57	-61	-85	-4	24
			26/07/2026 14: 07	-51	-79	-6	28
P3	15	Latitud: -2.208467 Longitud: -80.87688	07/07/2026 10:43	-51	-74	-8	27
			26/07/2026 10:52	-51	-80	-8	7
			26/07/2026	-51	-78	-6	26

costera a diferentes distancias del eNodeB. Se observa una mejora en los valores de RSSI, RSRP

14:13

y SNR a medida que disminuye la distancia al nodo de transmisión, mientras que el RSRQ permanece constante en los tres puntos de medición. A continuación, se muestran capturas de datos obtenidos mediante G-NetTrack Lite a 300 m, 150 m y 15 m del eNodeB en la zona costera en tabla 25.

Tabla 25: Captura de las mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona costera

 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 13 PCI: 359 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -96 RSRQ: -8 SNR: 14,0 CQI: -88 Longitud: -80.87559 Latitud: -2,21 Velocidad: 0 km/h Dirección: 22° NE Alto: 29m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 13 PCI: 359 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -88 RSRQ: -8 SNR: 22,0 CQI: -88 Longitud: -80.87727 Latitud: -2,21 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 30m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51695 CID: 1 PCI: 357 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -74 RSRQ: -8 SNR: 27,0 CQI: -74 Longitud: -80.87731 Latitud: -2,21 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 26m
21/07/2026 - 8:38	21/07/2026 - 8:28	07/07/2026 - 10:43
 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51695 CID: 1 PCI: 357 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -78 RSRQ: -3 SNR: 29,0 CQI: -85 Longitud: -80.87585 Latitud: -2,21 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 29m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51695 CID: 1 PCI: 357 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -85 RSRQ: -4 SNR: 24,0 CQI: -85 Longitud: -80.87650 Latitud: -2,21 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 34m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51695 CID: 2 PCI: 358 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -80 RSRQ: -8 SNR: 7,0 CQI: -80 Longitud: -80.87729 Latitud: -2,21 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 34m
26/07/2026 - 11:04	26/07/2026 - 10:57	26/07/2026 - 10:52
 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51695 CID: 1 PCI: 357 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -85 RSRQ: -4 SNR: 26,0 CQI: -79 Longitud: -80.87580 Latitud: -2,21 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 24m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51695 CID: 1 PCI: 357 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -79 RSRQ: -6 SNR: 28,0 CQI: -79 Longitud: -80.87641 Latitud: -2,21 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 30m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51695 CID: 1 PCI: 357 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -78 RSRQ: -6 SNR: 26,0 CQI: -78 Longitud: -80.87706 Latitud: -2,21 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 29m
26/07/2026 - 14:02	26/07/2026 - 14: 07	26/07/2026 - 14:13

Captura de datos a 300 metros de distancia del eNodeB	Captura de datos a 150 metros de distancia del eNodeB	Captura de datos a 15 metros de distancia del eNodeB
---	---	--

Nota. Elaboración propia.

4.2.4 Indicadores de cobertura zona montañosa (G-NetTrack Lite)

Tabla 26: Mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona montañosa

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 26 se presentan las métricas obtenidas mediante G-NetTrack Lite en la zona montañosa a diferentes distancias. Se observa que los valores de RSSI presentan poca variación entre los puntos de medición, mientras que el RSRP y el SNR muestran cambios asociados a la distancia y las condiciones del entorno. El RSRQ presenta ligeras variaciones durante las mediciones.

Punto	Distancia al eNodeB (m)	Coordenadas GPS	Fecha y hora	RSSI leído (dBm)	RSRP leído (dBm)	RSRQ leído (dB)	SNR leído (dB)
P1	300	Latitud: -2.211346 Longitud: -80.86075	21/07/2026 8:47	-51	-74	-8	27
			26/07/2026 11:14	-51	-77	-8	22
			26/07/2026 13:38	-51	-77	-6	18
P2	150	Latitud: -2.210080 Longitud: -80.86084	21/07/2026 8:49	-51	-69	-9	22
			26/07/2026 11:21	-51	-80	-8	27
			26/07/2026 13:45	-51	-80	-8	27
P3	15	Latitud: -2.209051 Longitud: -80.86172	07/07/2026 11:00	-53	-86	-11	8
			26/07/2026 11:25	-57	-89	-13	5
			26/07/2026 13:50	-51	-80	-11	13

De igual manera se presentan capturas de datos obtenidas mediante G-NetTrack Lite a 300 m, 150 m y 15 m del eNodeB en la zona montañosa en tabla 27.

Tabla 27: Captura de las mediciones obtenidas mediante la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona montañosa

 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 12 PCI: 358 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -74 RSRQ: -8 SNR: 27.0 Longitud: -80.86075 Latitud: -2.2 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 95m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 12 PCI: 358 ARFCN: 1100 BAND: L2 F DL: 1980,0 MHz RSRP: -69 RSRQ: -9 SNR: 22.0 Longitud: -80.86084 Latitud: -2.2 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 102m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 1 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -86 RSRQ: -11 SNR: 8.0 Longitud: -80.86298 Latitud: -2.2 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 113m
21/07/2026 - 8:47	21/07/2026 - 8:49	07/07/2026 - 11:00
 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 2 PCI: 358 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -77 RSRQ: -8 SNR: 22.0 Longitud: -80.86051 Latitud: -2.2 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 94m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 2 PCI: 358 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -80 RSRQ: -8 SNR: 27.0 Longitud: -80.86071 Latitud: -2.2 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 94m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 2 PCI: 358 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -69 RSRQ: -13 SNR: 5.0 Longitud: -80.86354 Latitud: -2.2 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 104m
26/07/2026 - 11:14	26/07/2026 - 11:21	26/07/2026 - 11:25
 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 2 PCI: 358 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -77 RSRQ: -6 SNR: 18.0 Longitud: -80.86059 Latitud: -2.2 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 91m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 2 PCI: 358 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -80 RSRQ: -8 SNR: 27.0 Longitud: -80.86071 Latitud: -2.2 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 94m	 G-NetTrack Lite Operador: CNT MCC: 740 MNC: 02 TAC: 30510 eNB: 51551 CID: 2 PCI: 358 ARFCN: 2050 BAND: L4 F DL: 2120,0 MHz RSRP: -80 RSRQ: -11 SNR: 13.0 Longitud: -80.86354 Latitud: -2.2 Velocidad: 0 km/h Dirección: 0° N Alto: 112m
26/07/2026 - 13:38	26/07/2026 - 13:45	26/07/2026 - 13:50

Captura de datos a 300 metros de distancia del eNodeB	Captura de datos a 150 metros de distancia del eNodeB	Captura de datos a 15 metros de distancia del eNodeB
---	---	--

Nota. Elaboración propia.

4.3 Comparación referencial de los resultados entre GNU Radio y G-NetTrack Lite

El presente apartado realiza la comparación de los resultados de las métricas obtenidas por la plataforma SDR conformada por el HackRF One y GNU Radio con los resultados registrados mediante la aplicación G-NetTrack Lite. Dicha comparación es únicamente referencial, debido a que no se realizó un proceso de calibración del sistema de medición con un instrumento de referencia especializado. Por esta razón, los valores obtenidos mediante GNU Radio deben interpretarse como estimaciones relativas derivadas de la configuración implementada en el sistema.

4.3.1 Comparación de resultados entre GNU Radio y G-NetTrack Lite zona urbana

Comparación del RSSI (dBm)

Tabla 28: Comparación del indicador RSSI

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-77	-71
P1-M2	-63	-51
P1-M3	-62	-57
P2-M1	-74	-67
P2-M2	-55	-51
P2-M3	-54	-51
P3-M1	-72	-54
P3-M2	-56	-51
P3-M3	-56	-51

Nota. Elaboración propia.

Comparación del RSRP (dBm)

Tabla 29: Comparación del indicador RSRP

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-120	-98
P1-M2	-86	-76
P1-M3	-86	-83
P2-M1	-120	-94
P2-M2	-93	-58
P2-M3	-82	-67
P3-M1	-120	-87
P3-M2	-84	-81
P3-M3	-84	-75

Nota. Elaboración propia.

Comparación del RSRQ (dB)

Tabla 30: Comparación del indicador RSRQ

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-10	-10
P1-M2	-8	-7
P1-M3	-10	-8
P2-M1	-10	-8
P2-M2	-9	-7
P2-M3	-9	-8
P3-M1	-8	-9
P3-M2	-8	-11
P3-M3	-8	-8

Nota. Elaboración propia.

Comparación del SNR (dB)

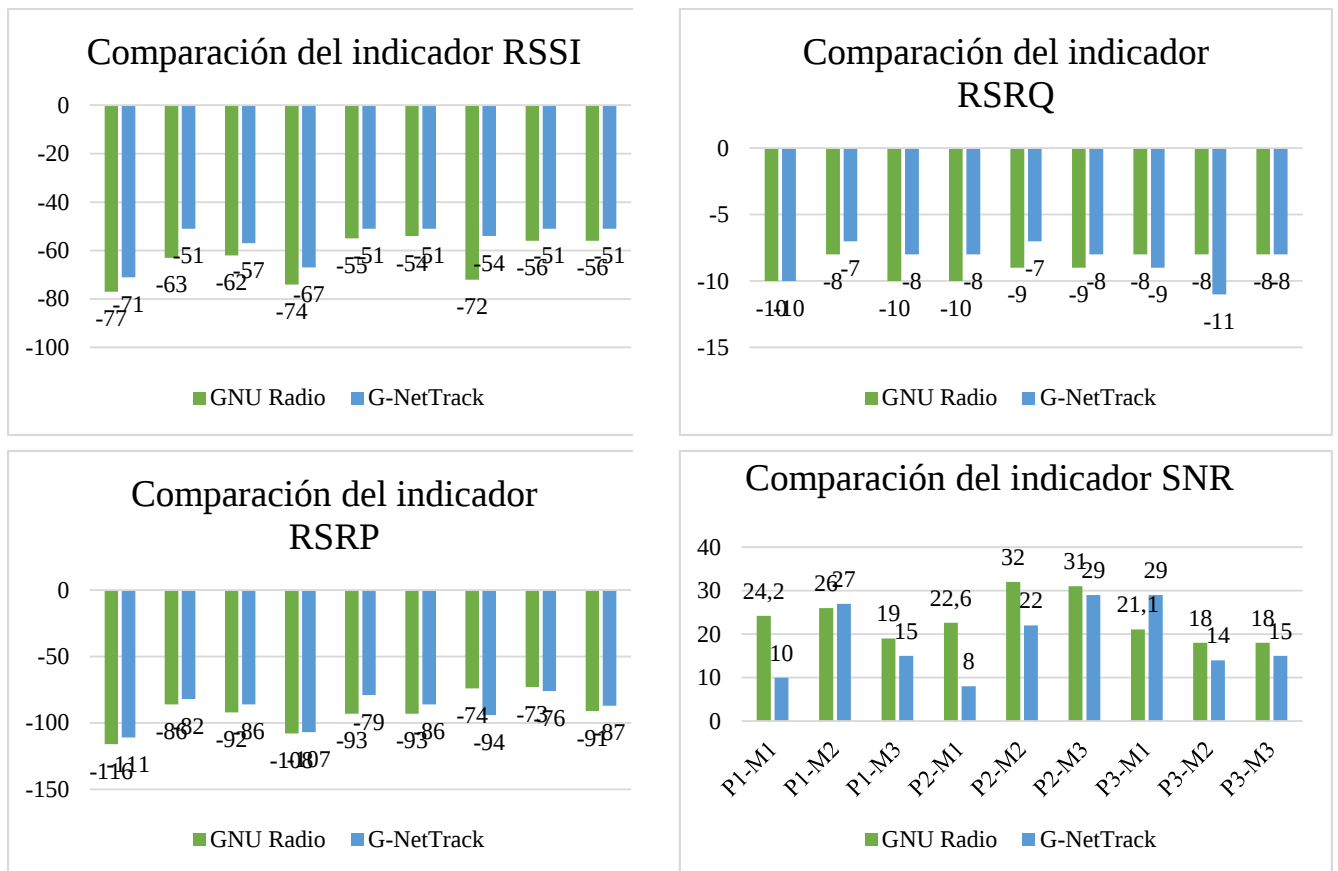
Tabla 31: Comparación del indicador SNR

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	24.2	10
P1-M2	26	27
P1-M3	19	15
P2-M1	22.6	8
P2-M2	32	22
P2-M3	31	29
P3-M1	21.1	29
P3-M2	18	14
P3-M3	18	15

Nota. Elaboración propia.

En las tablas 28, 29, 30 y 31 se realizan las comparativas de los resultados obtenidos para las variables RSSI, RSRP, RSRQ y SNR respectivamente mediante el dispositivo HackRF One junto con el software GNU Radio, y la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona urbana. En cada tabla, los términos P1, P2 y P3 hacen referencia a los puntos de medición con respecto al nodo, correspondientes a distancias de 300 metros, 150 metros y 15 metros respectivamente. Los términos M1, M2 y M3 simbolizan la medición 1, medición 2 y medición 3. Estos datos fueron tomados de las tablas 16 y 20 para su respectiva comparación y análisis.

Figura 74: Gráficas comparativas por puntos de zona urbana



Nota. Elaboración propia.

En la figura 75 se presentan los datos de las tablas 28, 29, 30 y 31, lo que permite visualizar las diferencias entre los resultados obtenidos mediante el programa GNU Radio (barras de color verde) y la aplicación móvil G-NetTrack Lite (barras de color azul) de una forma más didáctica y de fácil comprensión, facilitando el análisis referencial de este estudio. A pesar de que los parámetros no presentan diferencias relativamente pequeñas entre los datos obtenidos por el sistema de medición y la aplicación móvil, en el indicador RSSI GNU Radio presenta valores menores que los de G-NetTrack Lite. En el indicador RSRQ, ciertas mediciones no varían, mientras que las que sí varían mantienen los valores obtenidos por GNU Radio por debajo de los obtenidos por la aplicación móvil. En el parámetro del RSRP se observa que los valores estimados mediante GNU Radio se mantienen por debajo de los obtenidos con la aplicación móvil, a

excepción de los datos obtenidos en P3-M1 y P3-M2, donde los valores obtenidos mediante la aplicación móvil son menores que los obtenidos mediante el sistema de estimación.

4.3.2 Comparación de resultados entre GNU Radio y G-NetTrack Lite zona rural

Comparación del RSSI (dBm)

Tabla 32: Comparación del indicador RSSI

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-79	-79
P1-M2	-63	-55
P1-M3	-66	-61
P2-M1	-75	-75
P2-M2	-55	-63
P2-M3	-64	-61
P3-M1	-55	-67
P3-M2	-53	-51
P3-M3	-61	-59

Nota. Elaboración propia.

Comparación del RSRP (dBm)

Tabla 33: Comparación del indicador RSRP

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-116	-111
P1-M2	-86	-82
P1-M3	-92	-86
P2-M1	-108	-107
P2-M2	-93	-79
P2-M3	-93	-86
P3-M1	-74	-94
P3-M2	-73	-76
P3-M3	-91	-87

Nota. Elaboración propia.

Comparación del RSRQ (dB)

Tabla 34: Comparación del indicador RSRQ

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-15	-11
P1-M2	-8	-6
P1-M3	-9	-5
P2-M1	-10	-10
P2-M2	-9	-6
P2-M3	-8	-6
P3-M1	-8	-8
P3-M2	-8	-7
P3-M3	-9	-7

Nota. Elaboración propia.

Comparación del SNR (dB)

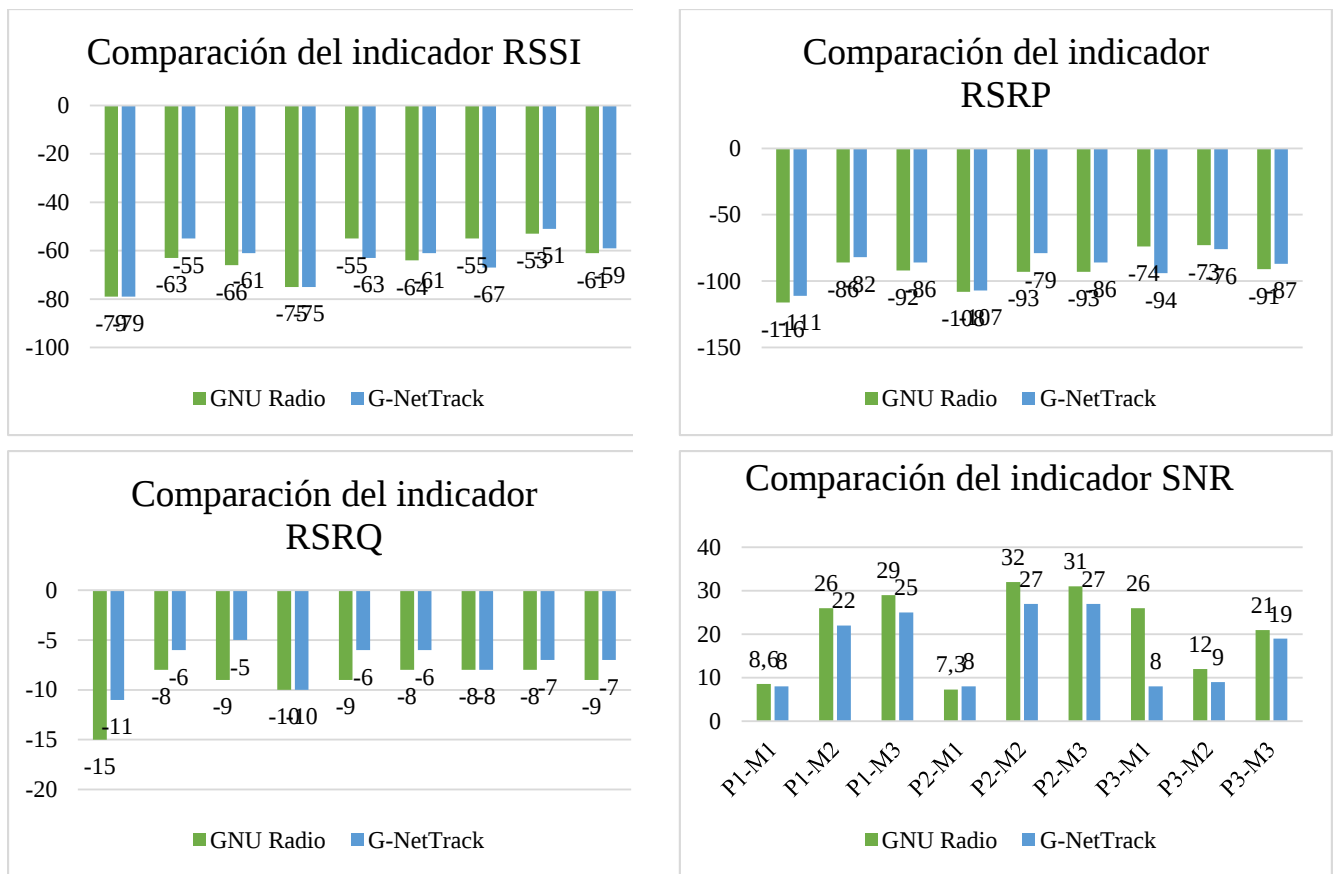
Tabla 35: Comparación del indicador SNR

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	8.6	8
P1-M2	26	22
P1-M3	29	25
P2-M1	7.3	8
P2-M2	32	27
P2-M3	31	27
P3-M1	26	8
P3-M2	12	9
P3-M3	21	19

Nota. Elaboración propia.

En las tablas 32, 33, 34 y 35 se realizan las comparativas de los resultados obtenidos de las variables RSSI, RSRP, RSRQ y SNR, respectivamente, mediante el dispositivo HackRF One junto con el software GNU Radio y la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona rural. En cada tabla, los términos P1, P2 y P3 hacen referencia a los puntos de medición con respecto al nodo, siendo las distancias de 300 metros, 150 metros y 15 metros, respectivamente. Los términos M1, M2 y M3 simbolizan las mediciones realizadas como medición 1, medición 2 y medición 3. Estos datos fueron tomados de las tablas 17 y 22 para su respectiva comparativa y análisis.

Figura 75: Gráficas comparativas por puntos de zona rural



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 76 se presentan los datos mostrados en las tablas 32, 33, 34 y 35, lo que permite visualizar las diferencias entre los resultados obtenidos mediante el programa GNU Radio (barras de color verde) y la aplicación móvil G-NetTrack Lite (barras de color azul) de una forma más didáctica y de fácil comprensión, facilitando el análisis referencial de este estudio. En el indicador RSSI, los valores obtenidos por la aplicación móvil muestran valores por debajo de los datos obtenidos por el sistema de medición, a excepción de las mediciones P1-M1 y P2-M1, donde se visualiza que los datos del sistema de medición y de la aplicación móvil fueron iguales. De igual forma, en el indicador RSRP la aplicación móvil muestra valores por debajo de los del sistema de medición, a excepción de la medición P2-M1, donde los datos fueron los mismos. Por otro lado, en el indicador RSRQ los datos obtenidos por medio del sistema de medición fueron menores que los de la aplicación móvil, manteniéndose la medición P2-M1 con el mismo valor. En el indicador

SNR, el sistema de medición mostró valores ligeramente superiores a los de la aplicación móvil, a excepción de la medición P2-M1, donde el valor obtenido por la aplicación móvil fue ligeramente mayor que el obtenido mediante el sistema de estimación con GNU Radio.

4.3.3 Comparación de resultados entre GNU Radio y G-NetTrack Lite zona costera

Comparación del RSSI (dBm)

Tabla 36: Comparación del indicador RSSI

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-74	-71
P1-M2	-61	-55
P1-M3	-63	-59
P2-M1	-68	-63
P2-M2	-71	-61
P2-M3	-55	-51
P3-M1	-52	-51
P3-M2	-54	-51
P3-M3	-54	-51

Nota. Elaboración propia.

Comparación del RSRP (dBm)

Tabla 37: Comparación del indicador RSRP

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-92	-96
P1-M2	-83	-78
P1-M3	-88	-85
P2-M1	-96	-88
P2-M2	-93	-85
P2-M3	-84	-79
P3-M1	-76	-74
P3-M2	-86	-80
P3-M3	-83	-78

Nota. Elaboración propia.

Comparación del RSRQ (dB)

Tabla 38: Comparación del indicador RSRQ

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-8	-8
P1-M2	-6	-3
P1-M3	-7	-4
P2-M1	-9	-8
P2-M2	-7	-4
P2-M3	-8	-6
P3-M1	-8	-8
P3-M2	-9	-8
P3-M3	-9	-6

Nota. Elaboración propia.

Comparación del SNR (dB)

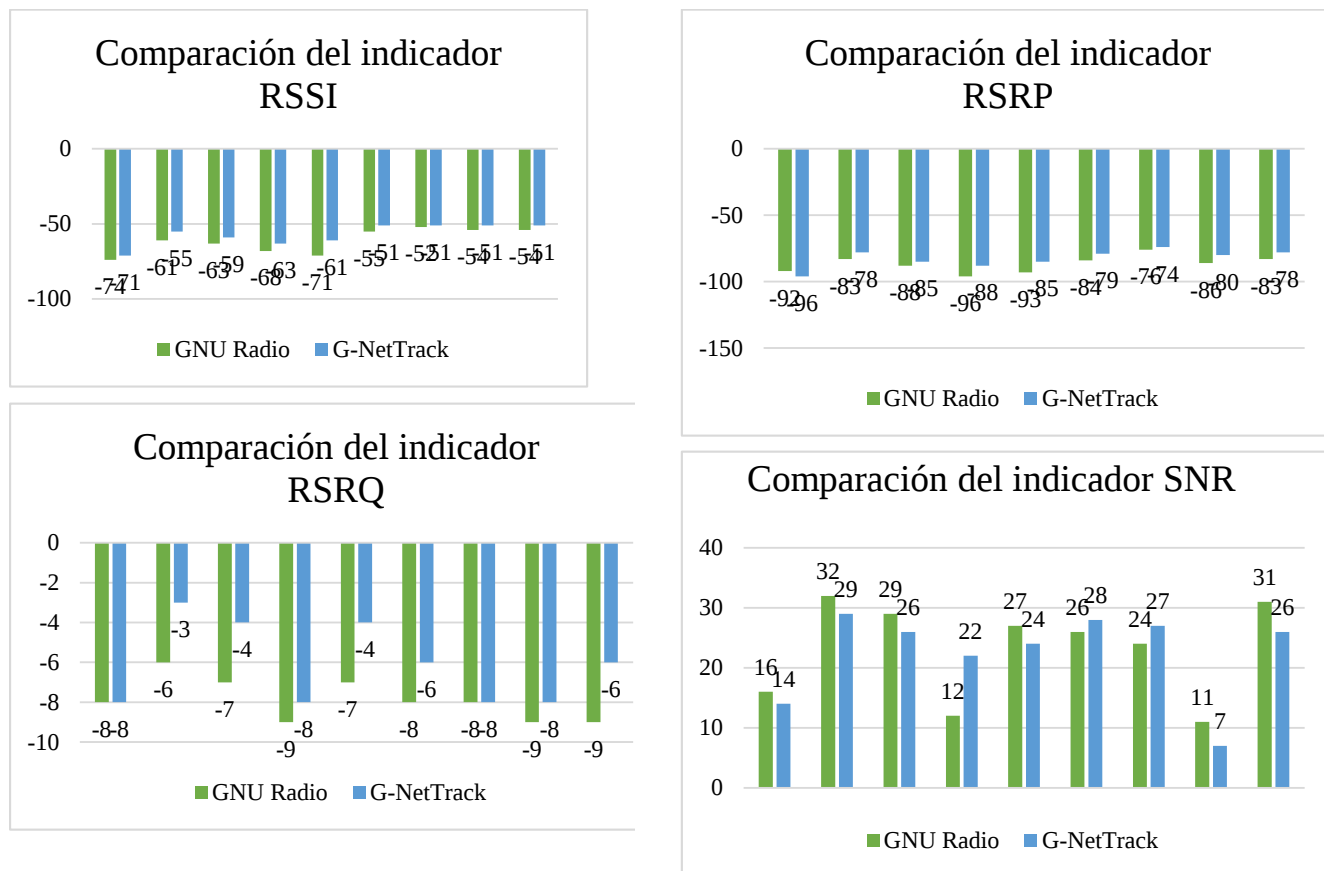
Tabla 39 : Comparación del indicador SNR

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	16	14
P1-M2	32	29
P1-M3	29	26
P2-M1	12	22
P2-M2	27	24
P2-M3	26	28
P3-M1	24	27
P3-M2	11	7
P3-M3	31	26

Nota. Elaboración propia

En las Tablas 36, 37, 38 y 39 se realizan las comparativas de los resultados obtenidos de las variables RSSI, RSRP, RSRQ y SNR, respectivamente, mediante el dispositivo HackRF One junto con el software GNU Radio y la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona costera. En cada tabla, los términos P1, P2 y P3 hacen referencia a los puntos de medición con respecto al nodo, siendo las distancias de 300 metros, 150 metros y 15 metros, respectivamente. Los términos M1, M2 y M3 simbolizan las mediciones realizadas como medición 1, medición 2 y medición 3. Estos datos fueron tomados de las tablas 18 y 24 para su respectiva comparativa y análisis.

Figura 76: Gráficas comparativas por puntos de zona costera



Nota. Elaboración propia.

En la figura 77 se presentan los datos mostrados en las tablas 36, 37, 38 y 39, lo que permite visualizar las diferencias entre los resultados obtenidos mediante el programa GNU Radio (barras de color verde) y la aplicación móvil G-NetTrack Lite (barras de color azul) de una forma más didáctica y de fácil comprensión, facilitando el análisis referencial de este estudio. En el indicador RSSI, los datos obtenidos mediante el sistema de estimación de GNU Radio se encuentran por debajo de los obtenidos por la aplicación móvil. De igual forma, en el indicador RSRP, los valores obtenidos por el sistema de estimación de GNU Radio se mantuvieron por debajo de los obtenidos por la aplicación móvil, a excepción de la medición P1-M1, donde el valor del RSRP obtenido mediante la aplicación móvil estuvo por debajo del obtenido por GNU Radio. En el indicador RSRQ, en las mediciones P1-M1 y P3-M1, los datos obtenidos mediante la aplicación móvil y el sistema de estimación de GNU Radio se mantuvieron iguales en -8, mientras

que en las demás mediciones los valores obtenidos por GNU Radio fueron menores que los obtenidos por la aplicación móvil. En el indicador SNR, se observa que los datos obtenidos por el sistema de medición de GNU Radio se encuentran por encima de los obtenidos por la aplicación móvil, a excepción de las mediciones P2-M1, P2-M3 y P3-M1, donde los datos obtenidos mediante la aplicación móvil fueron ligeramente superiores a los obtenidos por el sistema de medición de GNU Radio.

4.3.4 Comparación de resultados entre GNU Radio y G-NetTrack Lite zona montañosa

Comparación del RSSI (dBm)

Tabla 40: Comparación del indicador RSSI

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-52	-51
P1-M2	-54	-51
P1-M3	-55	-51
P2-M1	-51	-51
P2-M2	-63	-51
P2-M3	-53	-51
P3-M1	-54	-53
P3-M2	-62	-57
P3-M3	-51	-51

Nota. Elaboración propia.

Comparación del RSRP (dBm)

Tabla 41: Comparación del indicador RSRP

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-72	-74
P1-M2	-84	-77
P1-M3	-82	-77
P2-M1	-64	-69
P2-M2	-78	-80
P2-M3	-85	-80
P3-M1	-87	-86
P3-M2	-96	-89
P3-M3	-80	-80

Nota. Elaboración propia.

Comparación del RSRQ (dB)

Tabla 42: Comparación del indicador RSRQ

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	-9	-8
P1-M2	-9	-8
P1-M3	-7	-6
P2-M1	-10	-9
P2-M2	-6	-8
P2-M3	-9	-8
P3-M1	-9	-11
P3-M2	-17	-13
P3-M3	-11	-11

Nota. Elaboración propia.

Comparación del SNR (dB)

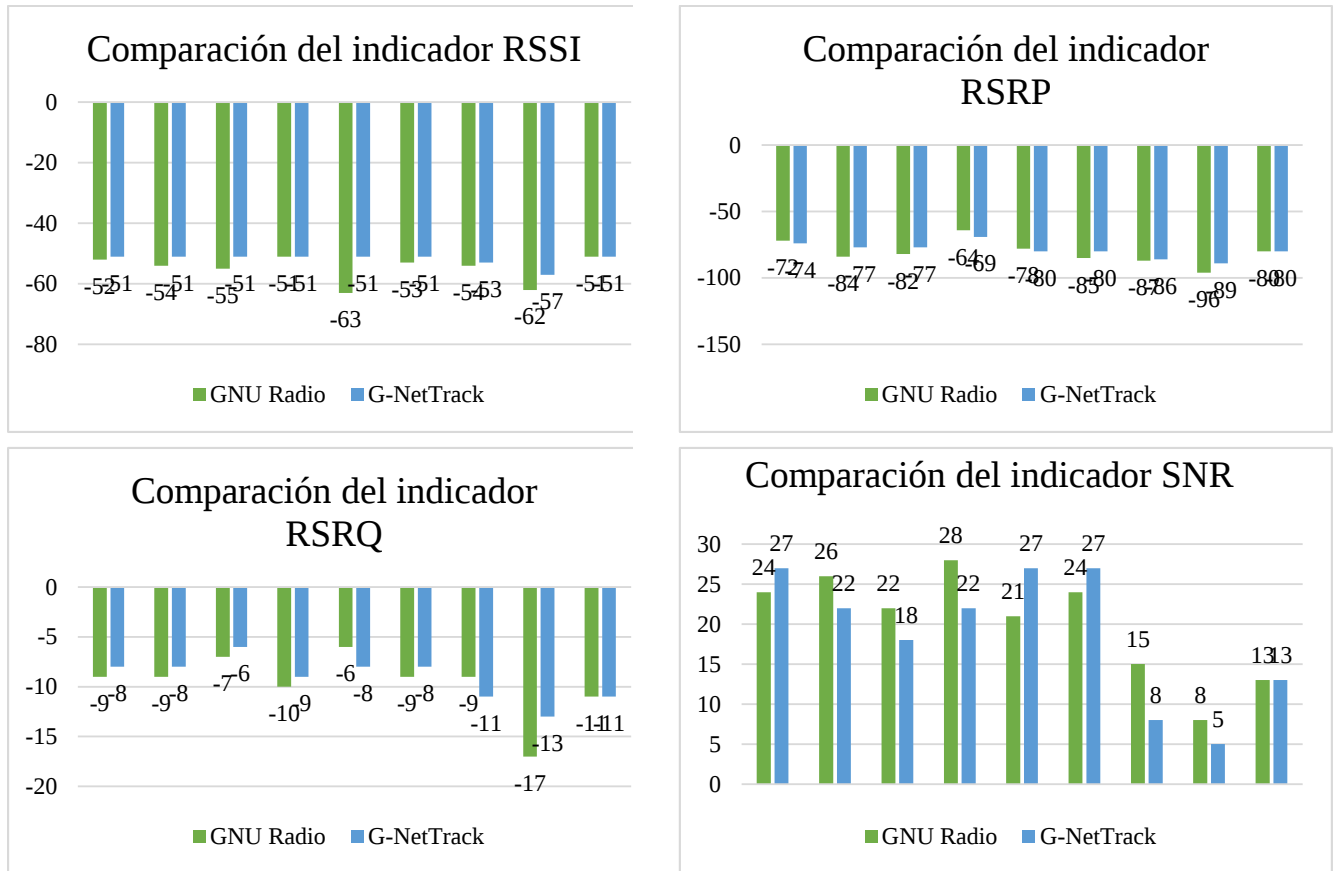
Tabla 43: Comparación del indicador SNR

Medición	GNU Radio	G-NetTrack
P1-M1	24	27
P1-M2	26	22
P1-M3	22	18
P2-M1	28	22
P2-M2	21	27
P2-M3	24	27
P3-M1	15	8
P3-M2	8	5
P3-M3	13	13

Nota. Elaboración propia.

En las tablas 40, 41, 42 y 43 se realizan las comparativas de los resultados obtenidos de las variables RSSI, RSRP, RSRQ y SNR, respectivamente, mediante el dispositivo HackRF One junto con el software GNU Radio y la aplicación móvil G-NetTrack Lite en la zona montañosa. En cada tabla, los términos P1, P2 y P3 hacen referencia a los puntos de medición con respecto al nodo, siendo las distancias de 300 metros, 150 metros y 15 metros, respectivamente. Los términos M1, M2 y M3 simbolizan las mediciones realizadas como medición 1, medición 2 y medición 3. Estos datos fueron tomados de las tablas 19 y 26 para su respectiva comparativa y análisis.

Figura 77: Gráficas comparativas por puntos de zona montañosa



Nota. Elaboración propia.

En la figura 78 se presentan los datos mostrados en las tablas 40, 41, 42 y 43, lo que permite visualizar las diferencias entre los resultados obtenidos mediante el programa GNU Radio (barras de color verde) y la aplicación móvil G-NetTrack Lite (barras de color azul) de una forma más didáctica y de fácil comprensión, facilitando el análisis referencial de este estudio. En el indicador RSSI, las mediciones P2-M1 y P3-M3 se mantuvieron en -51 tanto en la aplicación móvil como en el sistema de estimación de GNU Radio, mientras que las demás mediciones mostraron valores en los que los obtenidos por la aplicación móvil fueron ligeramente mayores que los obtenidos por el sistema de estimación de GNU Radio. En el indicador RSRP se observa variabilidad entre los datos obtenidos en ambos sistemas, donde solo en la medición P3-M3 se registra el valor de -80

para ambos sistemas. De igual forma, en el indicador RSRQ se muestran los mismos valores en la medición P3-M3, con -11, mientras que las demás mediciones presentan valores distintos entre ambos sistemas. En el indicador SNR se aprecia variabilidad entre los datos obtenidos, observándose que la medición P3-M3 presenta el mismo valor en ambos sistemas, correspondiente a 13.

4.4 Discusión de resultados

En este estudio se busca obtener un sistema de estimación que refleje resultados obtenidos de las métricas de la red LTE en la banda AWS mediante el uso del dispositivo SDR HackRF One en conjunto con el software GNU Radio. Para que los datos obtenidos por estas herramientas sean comparables; se realizaron mediciones en cuatro zonas geográficas distintas variando las distancias del sistema de estimación con respecto al eNodeB de cada zona de estudio y comparando los datos obtenidos mediante el sistema con los datos obtenidos por la aplicación móvil G-NetTrack Lite. A continuación, se muestran los análisis obtenidos por parámetro:

Indicador de intensidad de señal Recibida (RSSI): Este valor estima la intensidad en la que una señal inalámbrica llega a un dispositivo, ya sea esta señal Bluetooth, Wi-Fi o datos móviles. En este estudio las zonas montañosa y costera presentaron los valores de RSSI más elevados mientras que la zona urbana presentó los valores de RSSI más bajo entre las zonas de estudio. Este comportamiento en la zona montañosa se debe a la gran cantidad de nodos en la zona mientras que en la zona costera puede deberse a que es una zona casi urbana, pero sin la gran cantidad de usuarios que normalmente se encuentran ahí dando paso a una mayor intensidad de señal recibida. Por otro lado, los valores de RSSI en la zona rural es consistente a los valores típicos de este tipo de zonas en la que no se encuentra una gran cantidad de usuarios por lo que la intensidad de propagación de señal por parte de las empresas de telecomunicaciones para las redes móviles no suele ser tan alto.

Potencia de la señal de referencia recibida (RSRP): Este valor señala la intensidad de la señal LTE que recibe el dispositivo móvil, en este estudio los datos obtenidos de esta variable en el sistema de estimación de GNU Radio en comparación con los obtenidos por la aplicación móvil presentan una similitud considerable con los valores obtenidos mediante la aplicación móvil, lo

que permite realizar un contraste favorable de los resultados obtenidos mediante el sistema de estimación. Cabe destacar que, la zona montañosa presenta los valores de RSSI más elevados mientras que la zona rural es la zona que presenta los valores más bajos de RSSI. Esto se debe a que la zona montañosa a pesar de no representar tanta demanda se encuentra en un punto estratégico de la provincia de Santa Elena y presenta una gran cantidad de nodos, mientras que por otro lado en las zonas rurales este comportamiento podría estar relacionado con las características de demanda y despliegue de infraestructura propias de las zonas rurales.

Calidad de la señal de referencia recibida (RSRQ): Este parámetro estima que tan limpia y libre de interferencias se encuentra la señal de la red de estudio. En este caso entre los valores obtenidos por el sistema de estimación en GNU y la aplicación móvil, en todas las zonas de estudio se obtuvieron valores muy similares entre -15 dB y -8 dB. Sin embargo, la zona con mayor valor de RSRQ fue la zona costera mostrando ser la zona con la red más limpia, mientras que la zona urbana con un valor de -15 dB es la zona con mayor índice de interferencias en la red LTE en la banda AWS.

Relación señal a ruido (SNR): El SNR es la medida de comparación entre la señal útil y el ruido de fondo. En este parámetro la zona montañosa presenta tanto el valor máximo como el mínimo de SNR registrados durante las mediciones. Mientras el sistema de estimación se encuentra a mayor distancia del eNodeB el SNR aumenta mientras que al acercarse al eNodeB el valor del SNR disminuye. Este comportamiento podría estar relacionado con la presencia de múltiples nodos en la zona, los cuales pueden contribuir a un mayor nivel de interferencia.

Además, al realizar mediciones en distintas distancias del eNodeB en las zonas de estudio, se observó un cambio de portadora utilizada por el dispositivo móvil, lo que se reflejó en una variación de la frecuencia mostrada por G-NetTrack Lite. En consecuencia, fue necesario ajustar la frecuencia central del sistema de estimación implementado en GNU Radio para continuar con la captura y posterior comparación de los datos.

4.4.1 Análisis estadístico descriptivo

Metodología estadística

Para cada variable (RSSI, RSRP, RSRQ, SNR), en cada zona de medición y para cada herramienta (GNU Radio y G-NetTrack Lite), se dispone de 9 mediciones (3 puntos de medición P1, P2 y P3, correspondientes a 300 m, 150 m y 15 m respecto al nodo, con 3 mediciones cada uno: M1, M2, M3). Sin embargo, las mediciones tomadas en cada punto (M1, M2, M3) corresponden a mediciones bajo la misma condición experimental, es decir, misma zona y distancia del nodo. Por ello, la media, la varianza y el intervalo de confianza se calculan por separado para cada punto de medición (P1, P2, P3) de cada zona, en lugar de agrupar las tres distancias en un solo cálculo, ya que estas últimas representan condiciones distintas (300 m, 150 m y 15 m) y agruparlas distorsionaba la variabilidad real de cada condición. En cada punto de medición (P1, P2 o P3) de cada zona, y para cada herramienta (GNU Radio y G-NetTrack Lite), se dispone de $n = 3$ mediciones (M1, M2, M3), todas bajo la misma distancia al nodo. Se calculan los siguientes estadísticos:

Media aritmética ($\bar{x}$)

$$\bar{x} = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum x_i, \quad i = 1, 2, 3$$

Ecuación 16: Media aritmética

Donde:

- x_i es cada valor individual medido.
- n es el número total de mediciones.

Varianza muestral (s^2)

$$s^2 = \sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}$$

Ecuación 17: Varianza muestral

Se utiliza el divisor $(n - 1)$ por tratarse de una varianza muestral (estimador insesgado), no poblacional.

Desviación estándar (s) — medida de variabilidad

$$EE = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 18: Desviación estándar (s) — medida de variabilidad

Donde:

- s = Error estándar de la media (EE)

Intervalo de confianza (IC) al 95%

$$IC\ 95\% = \bar{x} \pm t\left(\frac{\alpha}{2}, n-1\right) \cdot EE$$

Ecuación 19: Intervalo de confianza (IC) al 95%

Con $n = 3$ ($gl = 2$) se emplea la distribución t de student. Para un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$) y $gl = 2$, el valor crítico es $t(0.025, 2) = 4.303$. Al ser una muestra muy pequeña, este valor crítico es considerablemente más alto que el usado con $n = 9$ ($t = 2.306$), por lo que los intervalos de confianza resultantes son más amplios: reflejan honestamente la mayor incertidumbre de estimar la variabilidad con solo 3 repeticiones por condición

Ejemplo de aplicación numérica

Se ilustra el procedimiento con los datos de RSSI en GNU Radio en la zona urbana en el Punto 1 (P1):

Datos (dBm): $\{-77, -63, -62\}$, $n = 3$

- **Paso 1 Media:**

$$\bar{x} = \frac{-77 - 63 - 62}{3} = \frac{-202}{3} = -67.33$$

- **Paso 2 Varianza muestral:**

$$s^2 = \sum \frac{(x_i - (-67.33))^2}{(3-1)} = \frac{140.67}{2} = 70.33$$

- **Paso 3 Desviación estándar:**

$$s = \sqrt{70.33} = 8.39$$

- **Paso 4 Error estándar:**

$$EE = \frac{8.39}{\sqrt{3}} = 4.84$$

- **Paso 5 Intervalo de confianza (95%, $gl=n-1=2$, $t=4,303$):**

$$IC = -67.33 \pm (4.303 \times 4.84) = -67.33 \pm 20.83$$

$$IC\ 95\% = [-88.17, -46.50]$$

Este mismo procedimiento se replicó para cada combinación de zona $\times$ punto (P1, P2, P3) $\times$ dispositivo $\times$ variable, obteniendo 4 zonas $\times$ 3 puntos $\times$ 2 dispositivos = 24 filas de resultados por cada variable.

A continuación, para cada variable, se presenta la media, varianza, desviación estándar e intervalo de confianza al 95% ($n=3$), discriminados por zona y por punto de medición (distancia al nodo). Los resultados completos se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 44: RSSI

Zona	Punto	Dispositivo	n	Media ($\bar{x}$)	Varianza (s^2)	Desv. Est. (s)	IC 95%
Urbana	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-67.33	70.33	8.39	[-88.17 , -46.50]
Urbana	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-59.67	105.33	10.26	[-85.16 , -34.17]
Urbana	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-61.00	127.00	11.27	[-88.99 , -33.01]
Urbana	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-56.33	85.33	9.24	[-79.28 , -33.39]
Urbana	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-61.33	85.33	9.24	[-84.28 , -38.39]
Urbana	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-52.00	3.00	1.73	[-56.30 , -47.70]
Rural	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-69.33	72.33	8.50	[-90.46 , -48.21]
Rural	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-65.00	156.00	12.49	[-96.03 , -33.97]
Rural	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-64.67	100.33	10.02	[-89.55 , -39.78]
Rural	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-66.33	57.33	7.57	[-85.14 , -47.52]
Rural	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-56.33	17.33	4.16	[-66.68 , -45.99]
Rural	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-59.00	64.00	8.00	[-78.87 , -39.13]
Costera	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-66.00	49.00	7.00	[-83.39 , -48.61]
Costera	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-61.67	69.33	8.33	[-82.35 , -40.98]
Costera	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-64.67	72.33	8.50	[-85.79 , -43.54]
Costera	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-58.33	41.33	6.43	[-74.30 , -42.36]

Costera	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-53.33	1.33	1.15	[-56.20 , -50.46]
Costera	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-51.00	0.00	0.00	[-51.00 , -51.00]
Montañosa	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-53.67	2.33	1.53	[-57.46 , -49.87]
Montañosa	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-51.00	0.00	0.00	[-51.00 , -51.00]
Montañosa	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-55.67	41.33	6.43	[-71.64 , -39.70]
Montañosa	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-51.00	0.00	0.00	[-51.00 , -51.00]
Montañosa	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-55.67	32.33	5.69	[-69.79 , -41.54]
Montañosa	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-53.67	9.33	3.06	[-61.26 , -46.08]

Nota. Elaboración propia.

Tabla 45: RSRP

Zona	Punto	Dispositivo	n	Media ($\bar{x}$)	Varianza (s^2)	Desv. Est. (s)	IC 95%
Urbana	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-97.33	385.33	19.63	[-146.10 , -48.57]
Urbana	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-85.67	126.33	11.24	[-113.59 , -57.75]
Urbana	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-98.33	382.33	19.55	[-146.91 , -49.76]
Urbana	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-73.00	351.00	18.73	[-119.54 , -26.46]
Urbana	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-96.00	432.00	20.78	[-147.63 , -44.37]
Urbana	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-81.00	36.00	6.00	[-95.90 , -66.10]
Rural	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-98.00	252.00	15.87	[-137.43 , -58.57]
Rural	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-93.00	247.00	15.72	[-132.04 , -53.96]
Rural	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-98.00	75.00	8.66	[-119.51 , -76.49]
Rural	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-90.67	212.33	14.57	[-126.86 , -54.47]
Rural	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-79.33	102.33	10.12	[-104.46 , -54.20]
Rural	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-85.67	82.33	9.07	[-108.21 , -63.13]
Costera	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-87.67	20.33	4.51	[-98.87 , -76.47]
Costera	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-86.33	82.33	9.07	[-108.87 , -63.79]
Costera	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-91.00	39.00	6.24	[-106.51 , -75.49]
Costera	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-84.00	21.00	4.58	[-95.38 , -72.62]

Costera	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-81.67	26.33	5.13	[-94.41 , -68.92]
Costera	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-77.33	9.33	3.06	[-84.92 , -69.74]
Montañosa	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-79.33	41.33	6.43	[-95.30 , -63.36]
Montañosa	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-76.00	3.00	1.73	[-80.30 , -71.70]
Montañosa	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-75.67	114.33	10.69	[-102.23 , -49.10]
Montañosa	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-76.33	40.33	6.35	[-92.11 , -60.56]
Montañosa	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-87.67	64.33	8.02	[-107.59 , -67.74]
Montañosa	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-85.00	21.00	4.58	[-96.38 , -73.62]

Nota. Elaboración propia.

Tabla 46: RSRQ

Zona	Punto	Dispositivo	n	Media ($\bar{x}$)	Varianza (s^2)	Desv. Est. (s)	IC 95%
Urbana	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-9.33	1.33	1.15	[-12.20 , -6.46]
Urbana	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-8.33	2.33	1.53	[-12.13 , -4.54]
Urbana	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-9.33	0.33	0.58	[-10.77 , -7.90]
Urbana	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-7.67	0.33	0.58	[-9.10 , -6.23]
Urbana	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-8.00	0.00	0.00	[-8.00 , -8.00]
Urbana	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-9.33	2.33	1.53	[-13.13 , -5.54]
Rural	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-10.67	14.33	3.79	[-20.07 , -1.26]
Rural	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-7.33	10.33	3.21	[-15.32 , 0.65]
Rural	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-8.67	1.33	1.15	[-11.54 , -5.80]
Rural	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-7.33	5.33	2.31	[-13.07 , -1.60]
Rural	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-8.33	0.33	0.58	[-9.77 , -6.90]
Rural	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-7.33	0.33	0.58	[-8.77 , -5.90]
Costera	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-7.00	1.00	1.00	[-9.48 , -4.52]
Costera	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-5.00	7.00	2.65	[-11.57 , 1.57]
Costera	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-8.00	1.00	1.00	[-10.48 , -5.52]
Costera	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-6.00	4.00	2.00	[-10.97 , -1.03]

Costera	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-8.67	0.33	0.58	[-10.10 , -7.23]
Costera	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-7.33	1.33	1.15	[-10.20 , -4.46]
Montañosa	P1 (300 m)	GNU Radio	3	-8.33	1.33	1.15	[-11.20 , -5.46]
Montañosa	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	-7.33	1.33	1.15	[-10.20 , -4.46]
Montañosa	P2 (150 m)	GNU Radio	3	-8.33	4.33	2.08	[-13.50 , -3.16]
Montañosa	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	-9.33	2.33	1.53	[-13.13 , -5.54]
Montañosa	P3 (15 m)	GNU Radio	3	-12.33	17.33	4.16	[-22.68 , -1.99]
Montañosa	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	-11.67	1.33	1.15	[-14.54 , -8.80]

Nota. Elaboración propia.

Tabla 47: SNR

Zona	Punto	Dispositivo	n	Media ($\bar{x}$)	Varianza (s^2)	Desv. Est. (s)	IC 95%
Urbana	P1 (300 m)	GNU Radio	3	23.07	13.21	3.64	[14.04 , 32.10]
Urbana	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	17.33	76.33	8.74	[-4.37 , 39.04]
Urbana	P2 (150 m)	GNU Radio	3	28.53	26.65	5.16	[15.71 , 41.36]
Urbana	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	19.67	114.33	10.69	[-6.90 , 46.23]
Urbana	P3 (15 m)	GNU Radio	3	19.03	3.20	1.79	[14.59 , 23.48]
Urbana	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	19.33	70.33	8.39	[-1.50 , 40.17]
Rural	P1 (300 m)	GNU Radio	3	21.20	121.32	11.01	[-6.16 , 48.56]
Rural	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	18.33	82.33	9.07	[-4.21 , 40.87]
Rural	P2 (150 m)	GNU Radio	3	23.43	195.46	13.98	[-11.30 , 58.16]
Rural	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	20.67	120.33	10.97	[-6.58 , 47.92]
Rural	P3 (15 m)	GNU Radio	3	19.67	50.33	7.09	[2.04 , 37.29]
Rural	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	12.00	37.00	6.08	[-3.11 , 27.11]
Costera	P1 (300 m)	GNU Radio	3	25.67	72.33	8.50	[4.54 , 46.79]
Costera	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	23.00	63.00	7.94	[3.28 , 42.72]
Costera	P2 (150 m)	GNU Radio	3	21.67	70.33	8.39	[0.83 , 42.50]
Costera	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	24.67	9.33	3.06	[17.08 , 32.26]

Costera	P3 (15 m)	GNU Radio	3	22.00	103.00	10.15	[-3.21 , 47.21]
Costera	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	20.00	127.00	11.27	[-7.99 , 47.99]
Montañosa	P1 (300 m)	GNU Radio	3	24.00	4.00	2.00	[19.03 , 28.97]
Montañosa	P1 (300 m)	G-NetTrack	3	22.33	20.33	4.51	[11.13 , 33.53]
Montañosa	P2 (150 m)	GNU Radio	3	24.33	12.33	3.51	[15.61 , 33.06]
Montañosa	P2 (150 m)	G-NetTrack	3	25.33	8.33	2.89	[18.16 , 32.50]
Montañosa	P3 (15 m)	GNU Radio	3	12.00	13.00	3.61	[3.04 , 20.96]
Montañosa	P3 (15 m)	G-NetTrack	3	8.67	16.33	4.04	[-1.37 , 18.71]

Nota. Elaboración propia.

Al calcular por punto ($n=3$) en lugar de por zona ($n=9$), los intervalos de confianza son considerablemente más amplios ($t=4.303$ vs $t=2.306$), lo cual es matemáticamente correcto: con sólo 3 repeticiones la incertidumbre sobre la verdadera media es mayor y debe reflejarse en el IC. Esta desagregación permite observar si la brecha entre GNU Radio y G-NetTrack Lite se mantiene, se reduce o se invierte según la distancia al nodo ($P1=300$ m, $P2=150$ m, $P3=15$ m), en lugar de diluirse en un promedio de las tres distancias. En general, se observa que a menor distancia ($P3$, 15 m) ambas herramientas tienden a mostrar valores más altos de señal (RSSI/RSRP menos negativos) y menor dispersión entre mediciones, mientras que a mayor distancia ($P1$, 300 m) la variabilidad y la discrepancia entre dispositivos tiende a ser mayor, especialmente en zona urbana.

La zona montañosa presenta la menor variabilidad de datos en el RSSI en ambos dispositivos, mientras que la zona urbana concentra la mayor dispersión en el RSRP. Este comportamiento puede estar asociado a las características propias del entorno urbano, como la propagación multitrajectory (multipath) y la presencia de obstáculos que afectan la propagación de la señal.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se llevó a cabo la exitosa creación e implementación de un sistema espectral utilizando el dispositivo SDR HackRF One junto a la aplicación GNU Radio, el cual permitió obtener estimaciones relativas como captura, filtrado y análisis de las señales de la red 4G LTE en la banda AWS en cuatro diferentes entornos de estudio. La ejecución del sistema demostró su funcionalidad para la adquisición y procesamiento de información espectral, estableciéndose como una herramienta adecuada u opción técnicamente viable para el monitoreo y análisis de señales LTE.
- Se realizaron mediciones de las métricas de cobertura y calidad de la red 4G LTE en la banda AWS mediante la aplicación G-NetTrack Lite en los entornos rural, urbano, costero y montañoso. Los resultados permitieron identificar diferencias en el comportamiento de las métricas entre los distintos escenarios de evaluación, evidenciando la influencia de las características propias de cada entorno sobre el desempeño de la señal.
- Con relación a la estimación de parámetros de la señal LTE en la banda AWS usando GNU Radio y HackRF One, se obtuvieron representaciones espectrales en el dominio de frecuencia y en espectrogramas, permitiendo identificar la frecuencia de la portadora central, el ancho de banda ocupado, los niveles de potencia y el comportamiento espectral. Estos resultados fortalecieron la capacidad de la metodología propuesta para realizar el monitoreo y análisis espectral de redes LTE.
- Acerca del análisis conjunto de las métricas de cobertura y calidad de la señal LTE, complementado con la interpretación de las capturas espectrales obtenidas en los diferentes entornos geográficos, evidenciaron variaciones en el desempeño de la señal entre los distintos escenarios, asociados al eNodeB como con el tipo de entorno. En las representaciones espectrales se observó incremento de los niveles RSSI y SNR y un piso de ruido más bajo a medida que se disminuye la distancia al eNodeB, confirmando la relación inversa esperada entre distancia al eNodeB y la calidad de la señal.

- Los resultados obtenidos en base a la revisión sistemática de investigaciones previas y del marco teórico sobre el monitoreo espectral de redes móviles con dispositivos SDR respaldan la metodología empleada. Esta propuesta permitió caracterizar de forma adecuada el comportamiento espectral de la red 4G LTE en la banda AWS, proporcionando información confiable para el análisis de la cobertura y la calidad de la señal en diferentes entornos.
- La comparación de las métricas LTE junto con los parámetros espectrales obtenidos mediante GNU Radio y HackRF One en los entornos urbano, rural, costero y montañoso, permitió caracterizar el comportamiento de la red 4G LTE en la banda AWS. El análisis descriptivo evidenció que el entorno montañoso registró las mejores medias de RSRP y RSSI, reflejando una mayor potencia de señal recibida, favorecida probablemente por condiciones de línea de vista más despejadas hacia el eNodeB. El entorno costero presentó el mejor RSRQ, lo que indica una relación más favorable entre la potencia de la señal de referencia y el nivel total de interferencia y ruido del canal, mientras que el entorno urbano obtuvo la mejor media de mientras que el entorno urbano presentó una media ligeramente inferior. En cuanto a la variabilidad, el entorno urbano mostró la mayor dispersión en RSSI y RSRP, consistente con fenómenos de propagación por trayectos múltiples y obstrucción por infraestructura propia de zonas densamente edificadas. Estos resultados evidencian que la calidad y estabilidad de la señal 4G LTE dependen tanto de la distancia al eNodeB como de las características físicas del entorno de propagación, y que un buen nivel de potencia recibida (RSRP/RSSI) no garantiza por sí solo una buena calidad de servicio, la cual debe evaluarse en conjunto con el RSRQ y el SNR. De esta manera, se cumple el objetivo de caracterizar el desempeño de la red en los escenarios evaluados, aportando evidencia técnica sobre el comportamiento diferenciado de la banda AWS según el tipo de entorno.
- Dado que el equipo utilizado no fue sometido a un proceso de calibración con instrumentos especializados por lo que los datos visualizados mediante el software GNU Radio no representan valores de mediciones absolutas. Por lo que, los datos obtenidos de las mediciones de la red LTE implican aproximaciones relativas y, en

consecuencia, el análisis y la comparativa presentados en este trabajo de titulación deben ser considerados como una estimación del comportamiento de la red LTE y no como parámetros exactos.

Recomendaciones

- Se recomienda ampliar la campaña de mediciones considerando distintos horarios en diversos radios de distancia con respecto a los eNodeB con el fin de evidenciar y caracterizar la variabilidad temporal y espacial de la red LTE en las distintas zonas de estudio.
- Se sugiere la incorporación de plataformas SDR de mayor robustez con el fin de obtener mejores resultados en cuanto a la visualización del espectro y las métricas LTE que se obtengan.
- Se recomienda ampliar el estudio hacia otras bandas y tecnologías móviles con el fin de obtener una comparativa multibanda y multi tecnológica en el espectro radioeléctrico de las redes móviles.
- Se sugiere el análisis de la ocupación espectral de las bandas adyacentes de la banda AWS de la red LTE para identificar las posibles fuentes de interferencia que puedan degradar la señal recibida por el HackRF One afectando la interpretación de los resultados que se obtengan.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3GPP. (2017). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 Version 14.3.0 Release 14). *Technical Specification Group Radio Access Network*.
- 3GPP. (2018). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 Version 15.2.0 Release 15). *Technical Specification Group Radio Access Network*.
- 3GPP. (2022). "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base station radio transmission and reception,". *3rd Generation Partnership Project, TS 36.104, v17.3.0*.
- 3GPP. (2022). "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation,". *3rd Generation Partnership Project, TS 36.211, v17.3.0, Sep. .*
- 3GPP. (2022). "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures,". *3rd Generation Partnership Project, TS 36.213, v17.4.0, Dec. .*
- Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones [ARCOTEL]. (2023). Estadísticas del sector de telecomunicaciones del Ecuador. <https://www.arcotel.gob.ec>.
- Analog Devices. (2018). ADALM-PLUTO software-defined radio active learning module,".
- ARCOTEL. (2024). Estadísticas del sector de telecomunicaciones Ecuador. *ARCOTEL*, Quito, Ecuador.
- Bechet. (2023). "Spectral analysis and digital signal processing in engineering using software defined radios and GNU Radio software,". *in Lecture Notes in Netw. Syst., Springer*.

- Blossom E. (2004). "GNU Radio: Tools for Exploring the Radio Frequency Spectrum," *Linux Journal*. 2004(122), 1-8.
- Boussad et al. (2021). "Evaluating smartphone accuracy for RSSI measurements,". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 70([Perspectiva: campaña de medición comparativa]), 1–12.
- Boussad et al. (2021). "Evaluating smartphone accuracy for RSSI measurements,". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 70, 1–12.
- BTS. (2024). Conceptos de arquitectura LTE. <https://yatebts.com/documentation/concepts/lte-concepts/>.
- Ettus Research. (n.d.). "USRP B210 product datasheet,". *National Instruments*, 2022, [Online]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/UB210-KIT/>.
- Ettus Research. (2022). What is GNU Radio? <https://www.gnuradio.org/>.
- Federal Communications Commission [FCC]. (2022). "Advanced Wireless Services (AWS)," FCC Wireless Bureau, Washington,D.C., [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/wireless/bureau-divisions/broadbanddivision/advanced-wireless-services-aws>.
- GNU Radio Project. (2024). GNU Radio documentation. <https://wiki.gnuradio.org>.
- GNU Radio Project. (2024). GNU Radio documentation. <https://wiki.gnuradio.org>.
- GNU Radio Project. (2024). GNU Radio Documentation. <https://wiki.gnuradio.org/>.
- GNU Radio Project. (2024). GNU Radio Documentation. <https://wiki.gnuradio.org/>.

- GNU Radio Project. (2024). GNU Radio Documentation.
- Goldsmith. (2022). Wireless communications. Cambridge University Press.
- Great Scott Gadget. (2025). NT500 telescopic antenna. <https://greatscottgadgets.com/ant500/>.
- Great Scott Gadgets. (2013). HackRF One Documentation.
https://hackrf.readthedocs.io/en/stable/hackrf_one.htm.
- GSMA Intelligence. (2023). *The mobile economy Latin America and the Caribbean 2023*, "GSMA, London, UK,, [Online]. Available:
<https://www.gsma.com/mobileeconomy/latam/>.
- Gyokov Solutions. (2017). G-NetTrack Lite User Guide.
- Gyokov Solutions. (2024). G-NetTrack documentation. <https://gykovsolutions.com>.
- HackRF. (2021). HackRF One Documentation.
- Helbet et al. (2021). (Artículo sobre monitoreo espectral LTE en tiempo real).
- Helbet et al. (2021). , "Realtime broadband electromagnetic spectrum monitoring system based on software defined radio technology,". *in Proc. MPS, Cluj-Napoca, Romania*, 1–6.
- INCIBE. (2021). La SDR y su rol en la ciberseguridad.
- ITU. (2023). Measuring digital development: Facts and figures. <https://www.itu.int>.
- ITU-R. (2011). "Spectrum monitoring handbook,". *International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland*.

- ITU-R. (2012). Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz (Recommendation ITU-R P.1546-5). *International Telecommunication Union*.
- ITU-R. (2018). Propagation by diffraction (Recommendation ITU-R P.526-14). *International Telecommunication Union*.
- ITU-R. (2019). Methodologies for measurements of outdoor radio noise (Recommendation ITU-R SM.1753-4). *International Telecommunication Union*.
- Jaimes Rico y Lazcano Salas. (2019). GNU Radio como plataforma para el procesamiento digital de señales.
- Lee, W. C. (1993). Mobile Communications Design Fundamentals (2nd ed.). *John Wiley & Sons, Inc.*
- Lime Microsystems s.f. (n.d.). LimeSDR Documentation.
- Logo, R. (2024). Arquitectura de red de acceso LTE. https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Arquitectura-de-red-de-acceso-LTE_fig2_257567337.
- Lyons. (2011). Understanding Digital Signal Processing (3rd ed.). Pearson.
- M. Sorecau, E. Sorecau, A. Sarbu, R. Helbet, and P. Bechet. (2022). "Electromagnetic spectrum monitoring of LTE channels based on SDR portable sensor: preliminary analysis," I. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 1254(1), 012009. doi: doi: 10.1088/1757-899x/1254/1/012009.

- McHenry et al. (2006). "Chicago spectrum occupancy measurements and analysis and a long-term studies proposal,". *in Proc. 1st Int. Workshop TAPAS Boston, MA, USA, .*
- Mejía, & Sanabria. (2021). Diseño de prototipo para monitoreo de parámetros de calidad de señal para sistemas de radio troncalizada. *Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica del Litoral.*
- Mitola. (1995). The Software Radio Architecture.
- Opensignal. (2024). Ecuador Mobile Network Experience Report.
- Oppenheim & Schaffer. (2010). Discrete-Time Signal Processing (3rd ed.). Pearson.
- Pozar, D. M. (2011). Microwave Engineering (4th ed.). *John Wiley & Sons, Inc.*
- Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2007). Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications (4th ed.). *Pearson Prentice Hall.*
- Rappaport. (2002). Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed. Upper Saddle River. *NJ, USA: Prentice Hall.*
- Rappaport et al. (2022). Wireless communications. *Principles and practice (3rd ed.). Pearson.*
- Rashid R. , N. Aripin, N. Fisal, and S. Yusof. (2011). R. Rashid, N. Aripin, N. Fisal, and S. Yusof, "Spectrum sensing measurement using GNU Radio and USRP software radio platform,". *in Proc. IEEE APCC*, 1–5.
- Razavi. (2011). RF Microelectronics (2nd ed.). *Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series.*

- Razavi, B. (2011). RF Microelectronics (2nd ed.). *Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series*.
- Reed. (2002). Software Radio: A Modern Approach to Radio Engineering. Upper Saddle River. NJ, USA: Prentice Hall.
- Reed J. M. . (2002). Software Radio: A Modern Approach to Radio Engineering. Upper Saddle River. NJ, USA: Prentice Hall,.
- Ruiz. (2015). Diseño de un algoritmo para el análisis y monitoreo de parámetros de señales LTE 4G utilizando la plataforma de Radio Definida por Software (USRP). *Universidad Politécnica Salesiana*.
- Sorecau et al. (2022). "Electromagnetic spectrum monitoring of LTE channels based on SDR portable sensor: preliminary analysis,". *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 1254(1), 012009. doi:10.1088/1757-899x/1254/1/012009.
- Sorecau et al. (2023). "Remote spectrum monitoring based on SDR-GNU Radio sensors: IQ streaming and FFT streaming,". in *Proc. Int. Conf. Mod. Power Syst. (MPS), Cluj-Napoca -Romania*, [Perspectiva: campaña de medición remota].
- Tandra, R., & Sahai, A. (2008). NR walls for signal detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2(1), 4–17. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2007.914879>.
- Ulvversøy. (2010). "Software defined radio: Challenges and opportunities,". *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 12(4), 531–550,. doi:doi: 10.1109/SURV.2010.032910.00038.

Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2024). Gestión mundial del espectro de frecuencias (UIT-R). UIT-R: Managing the radio-frequency spectrum for the world.

Vega, A. (2020). Introducción a la Radio Definida por Software.

Wireless Innovation Forum. (2023). Software Defined Radio.

<https://www.wirelessinnovation.org>.

Wright ; Ball. (2020). "Highly portable, low-cost SDR instrument for RF propagation studies," Aug. . *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 69(8), 5547–5557. doi:10.1109/TIM.2020.2966290.

ANEXOS

Anexo A: instalación y configuración del entorno de desarrollo

A.1 Preparación técnica

A continuación, se presenta el paso a paso de preparación técnica, donde se reúnen los componentes esenciales antes de iniciar la instalación del software GNU Radio.

A.2 Instalador de Python

Como primer paso se debe realizar la instalación de Python en su versión 2.7.15, cabe mencionar que esta versión de Python es la versión con mayor compatibilidad para GNU Radio.

A continuación, se presenta el enlace de descarga donde se encuentran los recursos necesarios para la correcta instalación de GNU Radio: https://drive.google.com/file/d/1iuxzRGfN5yHuKU5yKTB_HRhMaXZ7Exy3/view?usp=sharing, una vez descargado el archivo comprimido en formato “.rar” el archivo descargado deberá aparecer como se muestra a continuación en la figura A1. Según la carpeta en la que se haya guardado la descarga.

Figura A 1. Una captura del explorador de archivos de windows en la ruta.

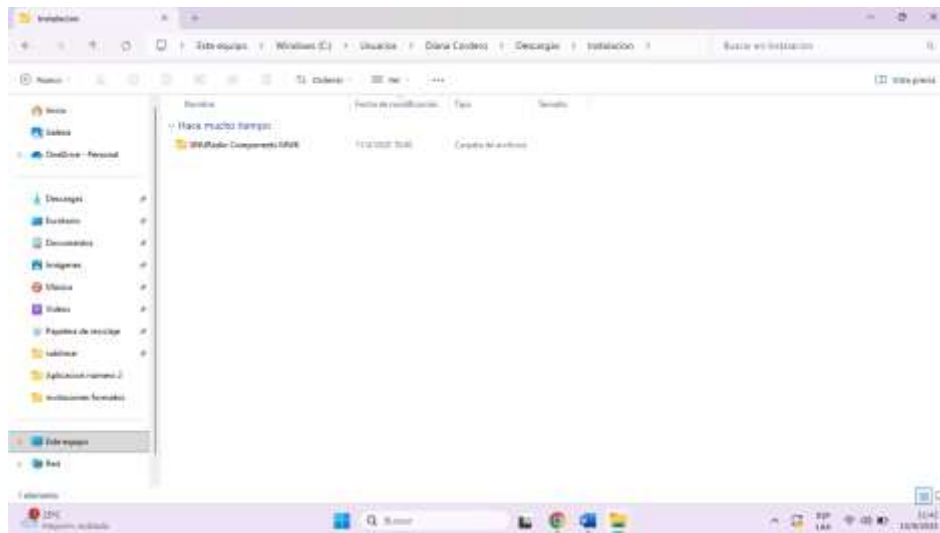


Figura A2: GNU Radio Components MMX.

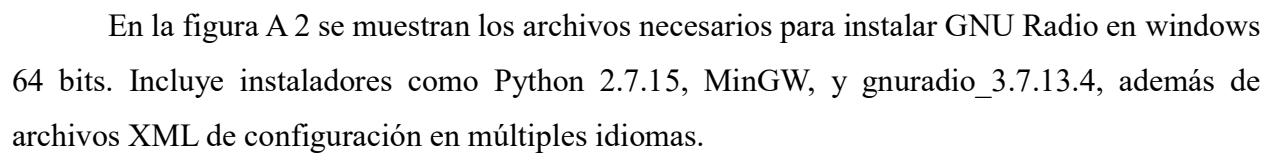
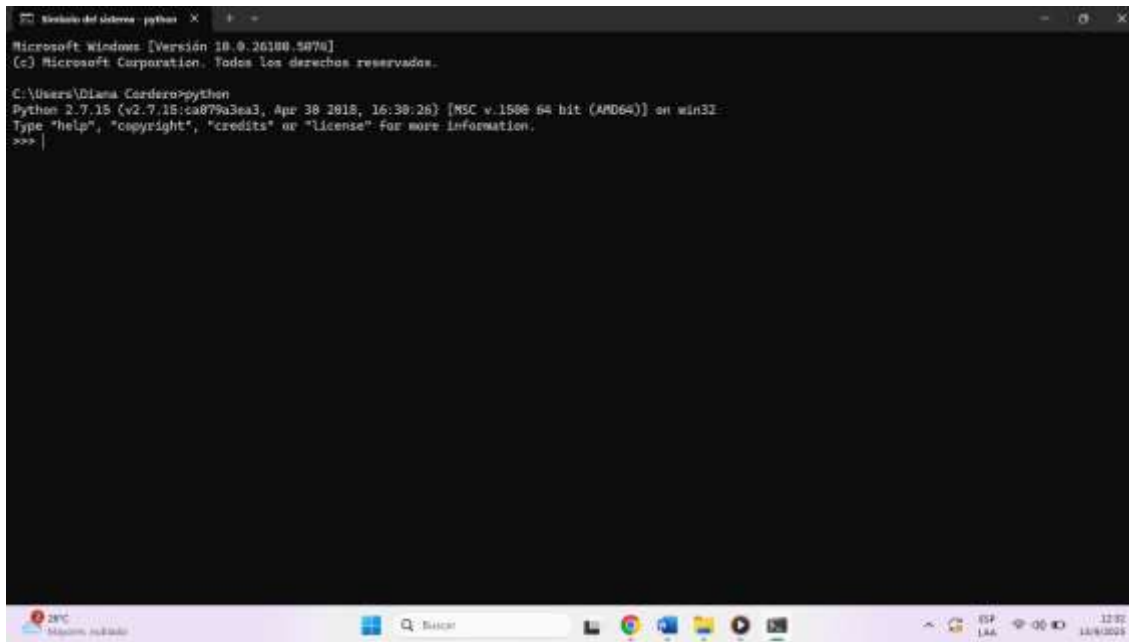


Figura A 3: Instalador de Python.



Como se observa en la figura A 3 el instalador "Python-2.7.15.amd64.msi" que aparece en la carpeta "GNURadio Components MMX", es el componente necesario para ejecutar GNU Radio en entornos windows de 64 bits. Este componente proporciona el entorno de ejecución requerido por GNU Radio para el funcionamiento del sistema SDR.

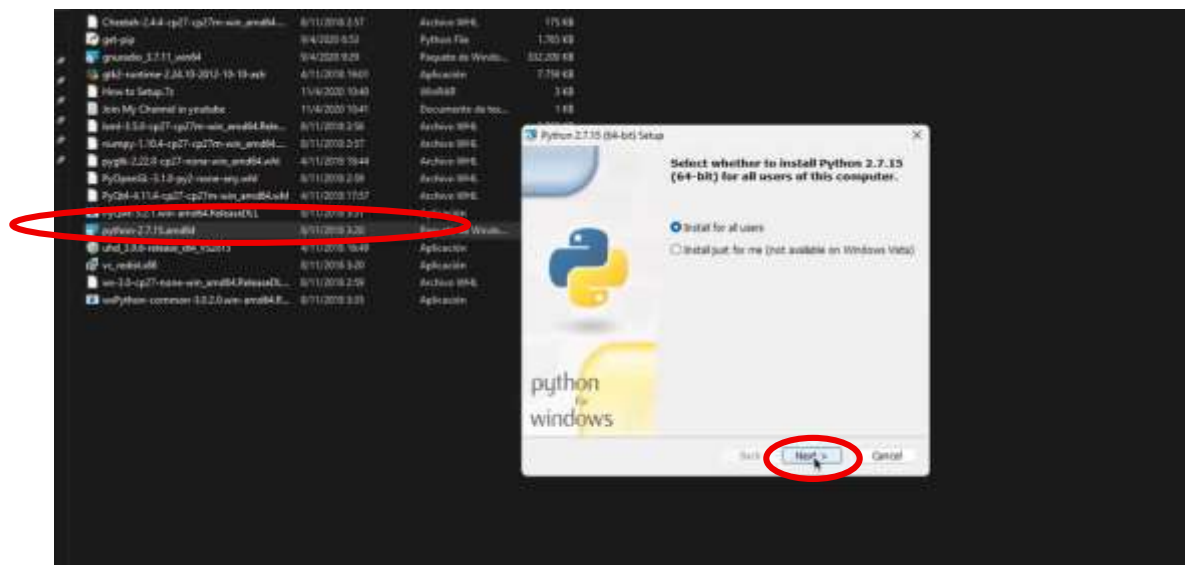
Figura A 4: Captura de pantalla del símbolo del sistema



Se abre la consola del símbolo del sistema como se muestra en la figura A 4 para verificar la versión que se encuentra instalada con el comando "python", en caso de no tener instalado Python o contar con una versión inferior a la versión 2.7.15 se recomienda instalar la versión que se encuentra en la carpeta "GNURadio Components MMX" y siguiendo los pasos descritos a continuación:

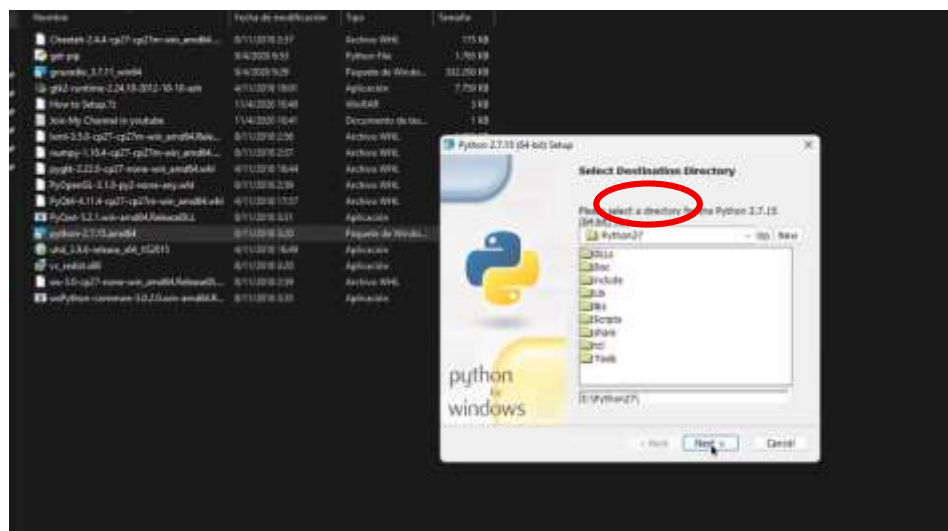
- a) Se ejecutó el instalador "python-2.7.15. amd64" y luego clic derecho en "Ejecutar como administrador", en caso de elegir la segunda opción, debe hacer clic en aceptar en la ventana que le aparecerá posteriormente.

Figura A 5: Instalador de Python



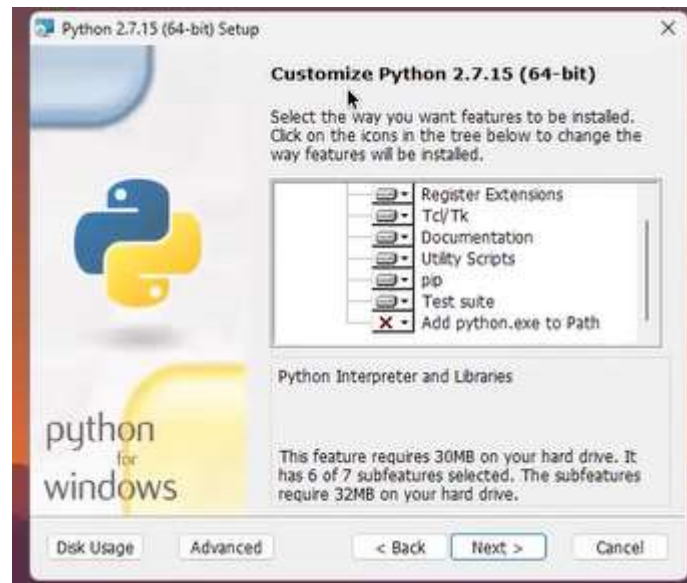
- b) En la figura A 5 se muestra la ventana de instalación de **Python 2.7.15 (64-bit)** en windows. El instalador solicita elegir entre instalarlo para todos los usuarios del equipo o solo para el usuario actual, para este caso se recomienda instalarlo para todos los usuarios y luego hacer clic en “Next”.

Figura A 6: Selección de la carpeta de instalación de Python.



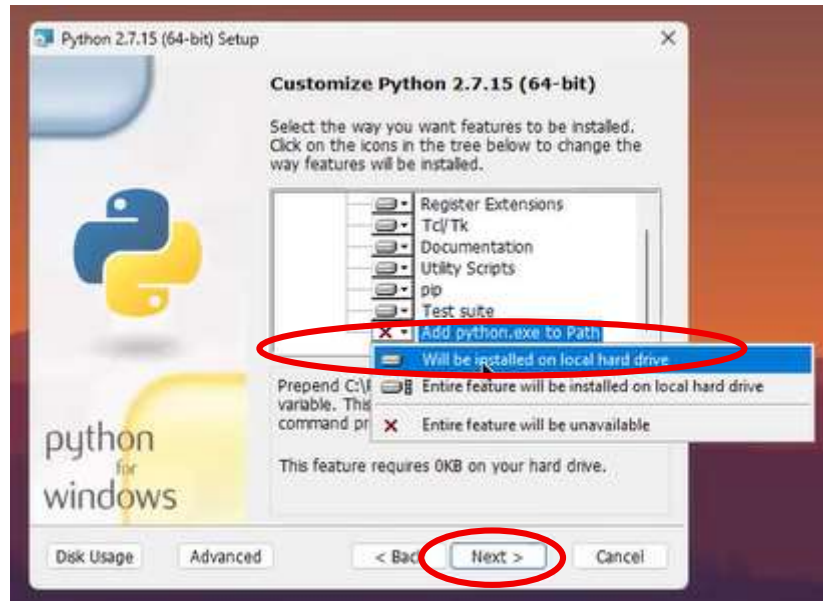
En la figura A 6, se muestra la selección del directorio de instalación para **Python 2.7.15 (64-bit)**, con la ruta predeterminada **C:\Python27**. Se visualizan las carpetas internas que se crearán, como DLLs, Lib, Tools, entre otras.

Figura A 7: Selección de componentes de Python.



Posteriormente, la figura A 7 muestra la selección de componentes durante la instalación de Python 2.7.15 (64-bit). Se activan herramientas clave como pip, Tcl/Tk, documentación y la opción de agregar Python al PATH, lo que permite adaptar el entorno a las necesidades de GNU Radio. Es un paso esencial para asegurar la compatibilidad y funcionalidad en el desarrollo SDR.

Figura A 8: Configuración personalizada de Python



La figura A 8 muestra la configuración personalizada de Python 2.7.15 (64-bit), donde se activan componentes esenciales como pip, Tcl/Tk y la opción de agregar Python al PATH, para que se instale en el disco local automáticamente.

Figura A 9: Proceso de carga de la instalación de Python.

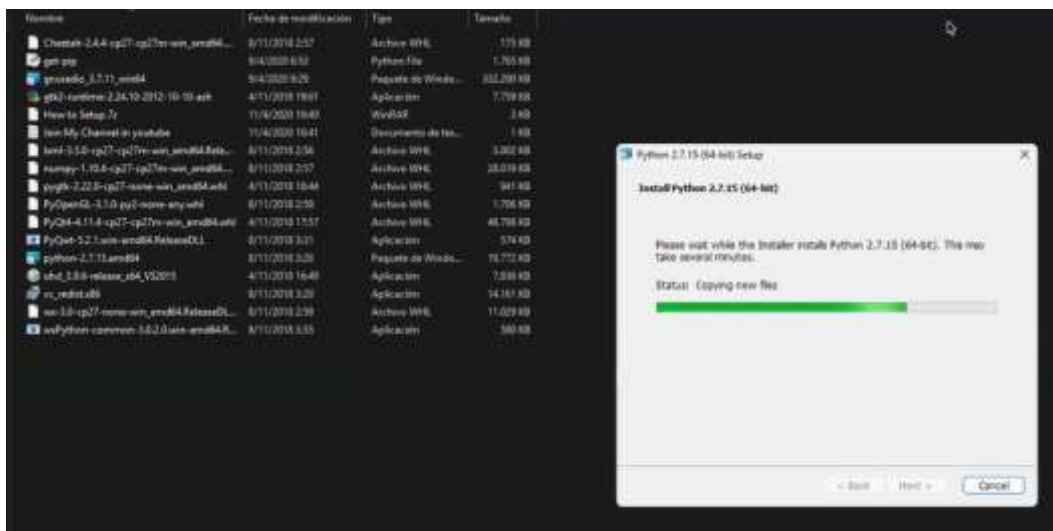
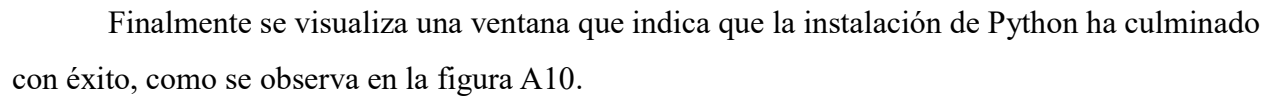


Figura A10: Instalación completa de Python.



A.3 Instalación de librerías

En este apartado se muestran todas las librerías a instalar para que el software GNU Radio permita utilizar GNU Radio adecuadamente y sin restricciones de dependencias.

Figura A11: Atajo al símbolo de sistemas de (windows).

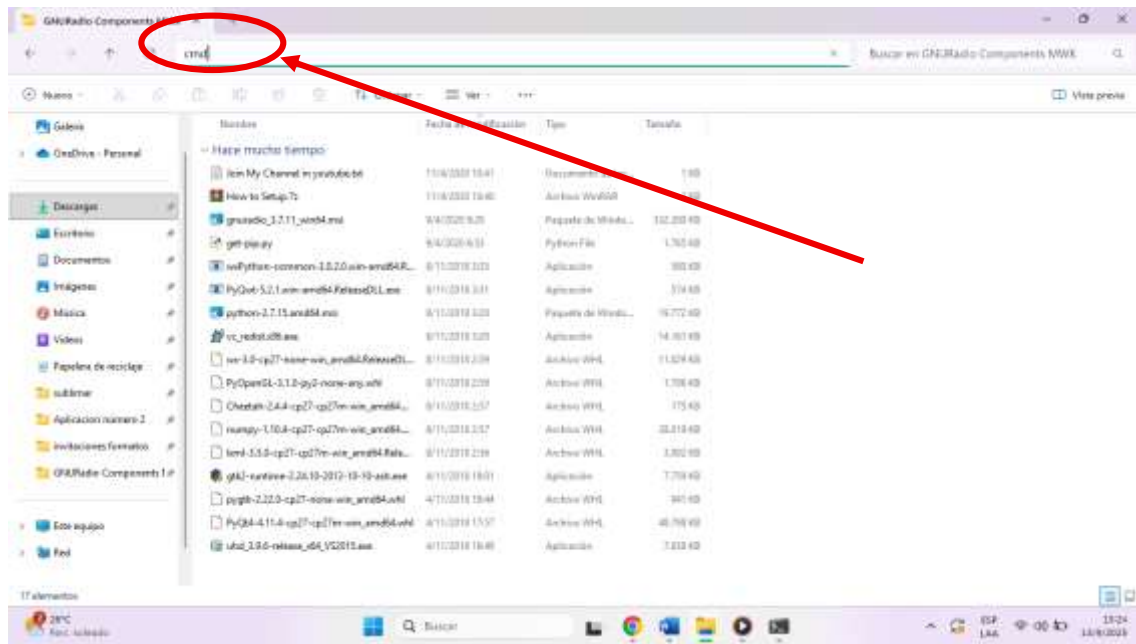
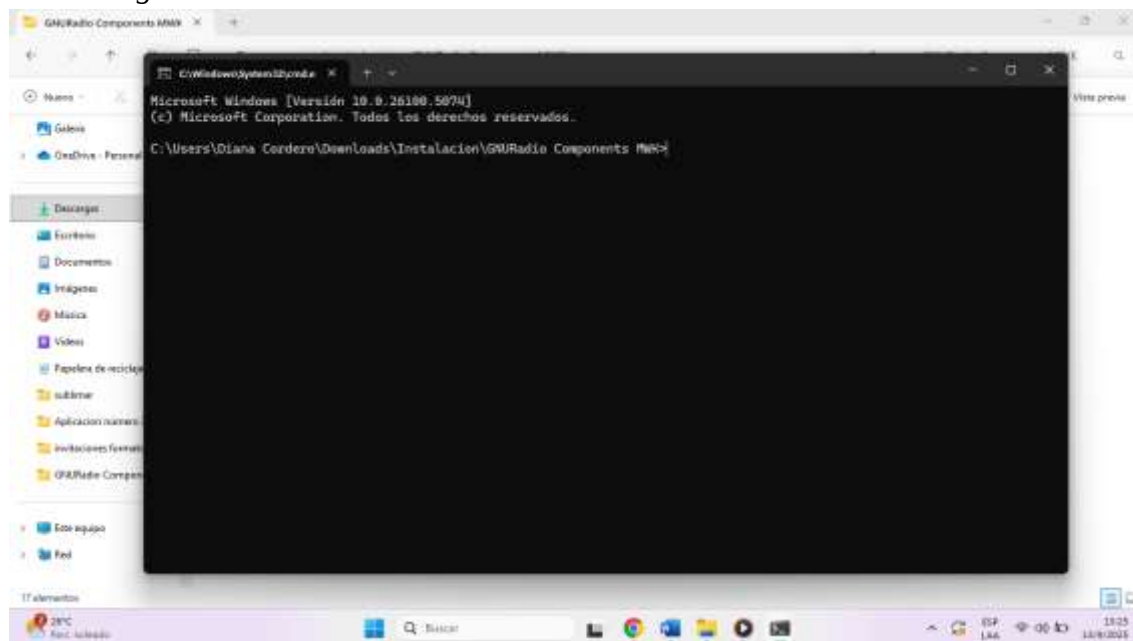


Figura A12: Terminal del símbolo de sistemas de windows.



Al escribir en el directorio de la carpeta las letras “cmd” como se observa en la figura A 11, posteriormente de hacer clic en la tecla “enter” se abrirá el terminal del símbolo de sistemas de windows con la dirección de la carpeta “GNURadio Components MMX” así como se observa en la figura 12, en esta ventana del terminal es donde se van a instalar las librerías de GNU Radio para evitar que surjan restricciones mientras se ejecuta el software.

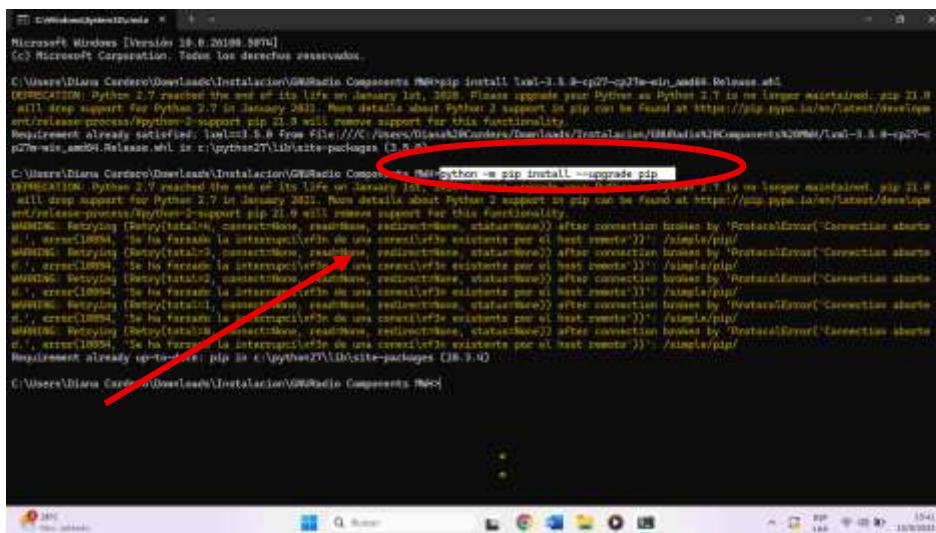
A continuación, se muestran los comandos que se deben insertar en la ventana del símbolo de sistemas de windows:

- [pip install lxml-3.5.0-cp27-cp27m-win_amd64.Release.whl.](#)
- [pip install numpy-1.10.4-cp27-cp27m-win_amd64.ReleaseDLL.whl.](#)
- [pip install PyQt4-4.11.4-cp27-cp27m-win_amd64.whl.](#)
- [pip install Cheetah-2.4.4-cp27-cp27m-win_amd64.ReleaseDLL.whl.](#)
- [pip install PyOpenGL-3.1.0-py2-none-any.whl.](#)
- [pip install pygtk-2.22.0-cp27-none-win_amd64.whl.](#)
- [pip install wx-3.0-cp27-none-win_amd64.ReleaseDLL.whl.](#)

Si se presenta un error en la ejecución de los comandos se deberá ingresar la siguiente línea de comando para corregir dichos errores:

- [python -m pip install --upgrade pip.](#)

Figura A13: Corrección de errores del símbolo de sistemas de windows.



```
Microsoft Windows [Versi3n 10.0.17134.0]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\Diara Cardero\Downloads\Instalaci3n\GNURadio Components\wxPython>pip install wxPython-common-3.0.2.0.win-amd64.ReleaseDLL
WARNING: Python 2.7 reached the end of its life on January 1st, 2020. Please upgrade your Python as Python 2.7 is no longer maintained. pip 21.0
will drop support for Python 2.7 in January 2021. More details about Python 2 support in pip can be found at https://pip.pypa.io/en/latest/develop
ers/release-process/#python-2-support pip 21.0 will remove support for this functionality.
Requirement already satisfied: wheel<0.38,=>0.34.2 in c:\python27\lib\site-packages (0.34.2)

C:\Users\Diara Cardero\Downloads\Instalaci3n\GNURadio Components\wxPython>python -m pip install --upgrade pip
WARNING: Python 2.7 reached the end of its life on January 1st, 2020. Please upgrade your Python as Python 2.7 is no longer maintained. pip 21.0
will drop support for Python 2.7 in January 2021. More details about Python 2 support in pip can be found at https://pip.pypa.io/en/latest/develop
ers/release-process/#python-2-support pip 21.0 will remove support for this functionality.
WARNING: Retrying (Retry(total=4, connect=None, read=None, redirect=None, status=None)) after connection broken by 'ProtocolError('Connection aborted
d.', error=10054, 'Se ha cerrado la conexi3n de una conexi3n existente por el host remoto')': /simple/pip/
WARNING: Retrying (Retry(total=3, connect=None, read=None, redirect=None, status=None)) after connection broken by 'ProtocolError('Connection aborted
d.', error=10054, 'Se ha cerrado la conexi3n de una conexi3n existente por el host remoto')': /simple/pip/
WARNING: Retrying (Retry(total=2, connect=None, read=None, redirect=None, status=None)) after connection broken by 'ProtocolError('Connection aborted
d.', error=10054, 'Se ha cerrado la conexi3n de una conexi3n existente por el host remoto')': /simple/pip/
WARNING: Retrying (Retry(total=1, connect=None, read=None, redirect=None, status=None)) after connection broken by 'ProtocolError('Connection aborted
d.', error=10054, 'Se ha cerrado la conexi3n de una conexi3n existente por el host remoto')': /simple/pip/
WARNING: Retrying (Retry(total=0, connect=None, read=None, redirect=None, status=None)) after connection broken by 'ProtocolError('Connection aborted
d.', error=10054, 'Se ha cerrado la conexi3n de una conexi3n existente por el host remoto')': /simple/pip/
Requirement already satisfied: pip in c:\python27\lib\site-packages (18.1.0)

C:\Users\Diara Cardero\Downloads\Instalaci3n\GNURadio Components\wxPython>
```

Una vez solucionado este error se procede con la instalaci3n de cada l3nea de c3digo de los complementos uno a uno.

Una vez instalado correctamente cada complemento se debe asegurar que aparezca el mensaje “Successfully installed pygtk-2.22.0”, el cual indica que est3 correctamente instalado.

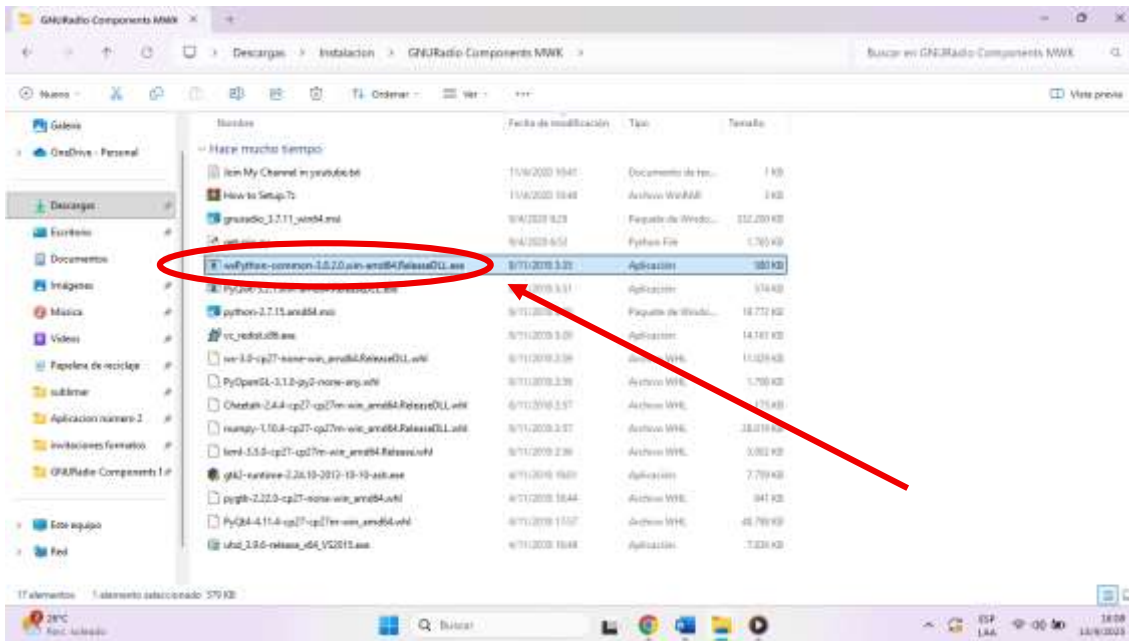
A.4 Instalaci3n de software adicional

Es importante la instalaci3n de software adicional o auxiliar, el cual aparece dentro de la carpeta de instalaci3n tal como se muestra en la figura A 2. A continuaci3n, se muestran todas y cada una de las instalaciones de los softwares que van de la mano con la correcta instalaci3n de GNU Radio.

A.4.1 Instalar el wxPython-common

Ahora se procede a instalar el wxPython-common-3.0.2.0.win-amd64.ReleaseDLL que est3 dentro de la carpeta de instalaci3n.

Figura A 14: Instalador de wxPython-common-3.0.2.0.win-amd64.ReleaseDLL.

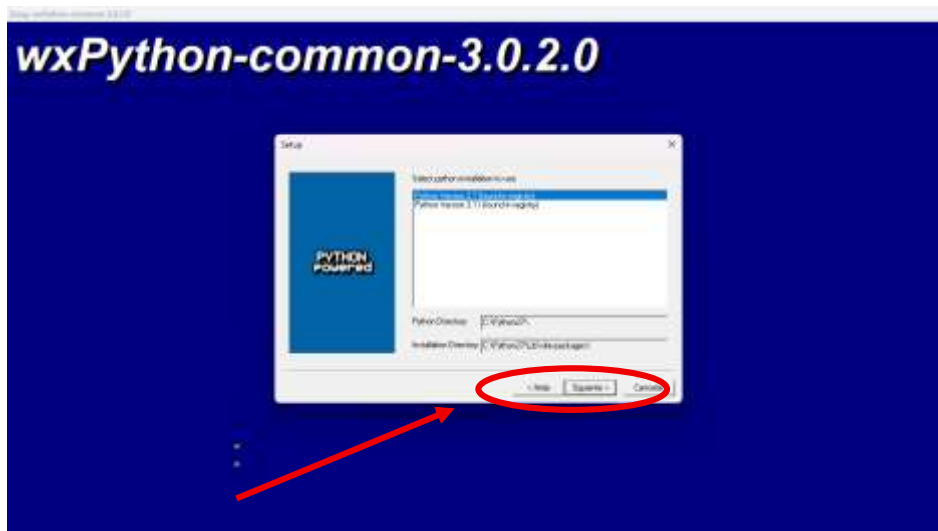


Se selecciona el archivo .exe con el nombre de “wxPython-common-3.0.2.0.win-amd64.ReleaseDLL” tal cual se observa en la figura A 14, se debe hacer doble clic y posteriormente aparecerá una ventana azul que se visualiza en la figura A 15, hacer doble clic en siguiente para continuar.

Figura A 15: Ejecución de wxPython-common-3.0.2.0, primera ventana

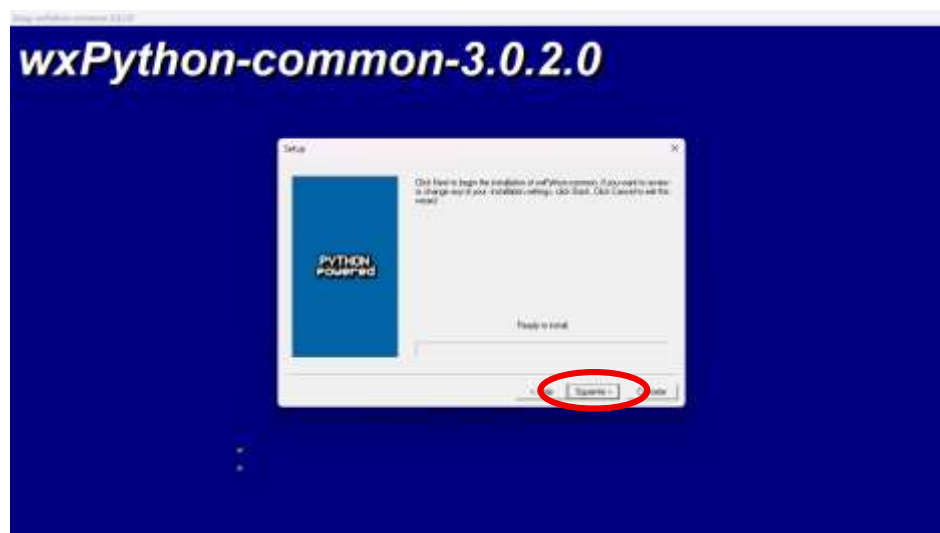


Figura A 16: Ejecución de wxPython-common-3.0.2.0, segunda ventana.



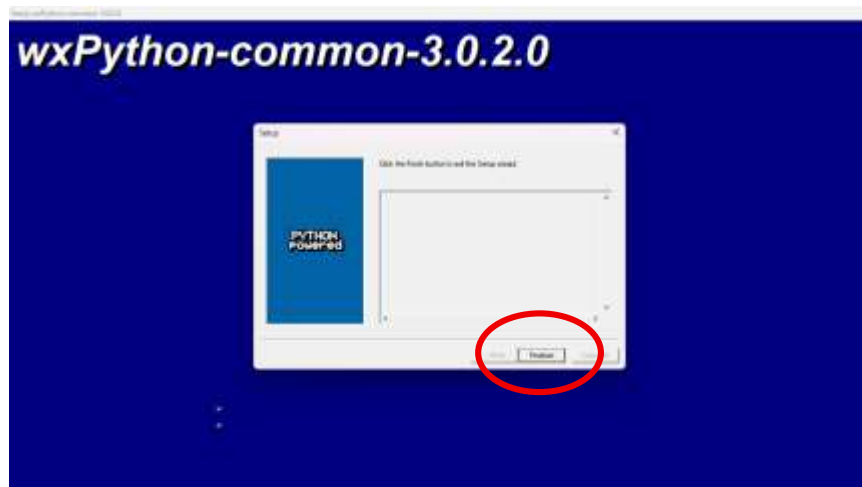
En la segunda ventana de wxPython se debe seleccionar Python 2.7.15 (64-bit) tal como se muestra en la figura A 16 y luego hacer clic en siguiente.

Figura A 17: Ejecución de wxPython-common-3.0.2.0, tercera ventana.



Finalmente, aparecerá la ventana A 17 que dice que la instalación del software ha sido un éxito, que se muestra en la figura A 18 y debe hacer clic en “finalizar” lo que cerrará la ventana del software.

Figura A 18: Ejecución de wxPython-common-3.0.2.0, cuarta ventana.



A.4.2 Instalación de UHD_3.9.6

Cualquier software “`uhd_3.9.6-release_x64_VS2015`”, que también está en la carpeta de los componentes de instalación, se selecciona el ejecutable como se observa en la figura A 19 y luego hacer doble clic, aparecerá la ventana de instalación en la que aparecen los términos de instalación del software, que se visualiza en la figura A 20 y se le debe hacer clic siguiente.

Figura A 19: Ejecutable del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015.

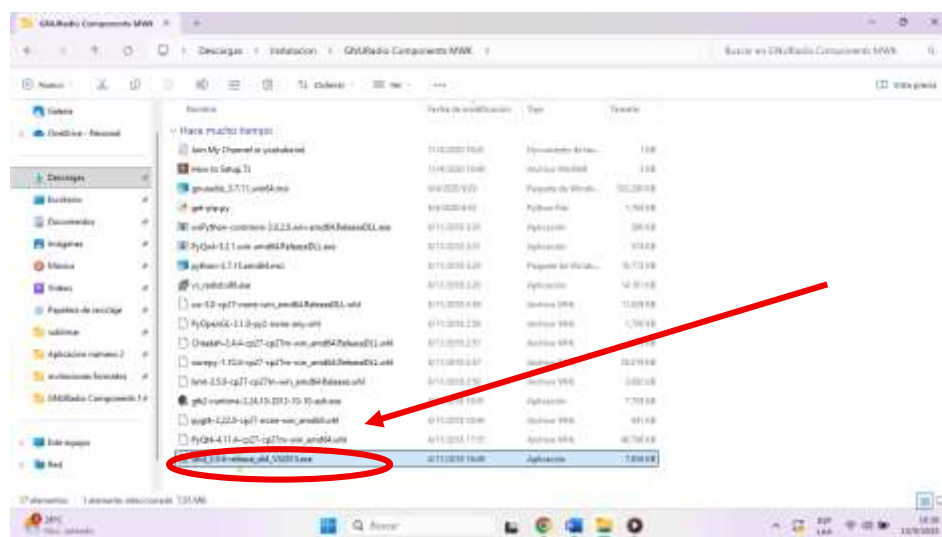
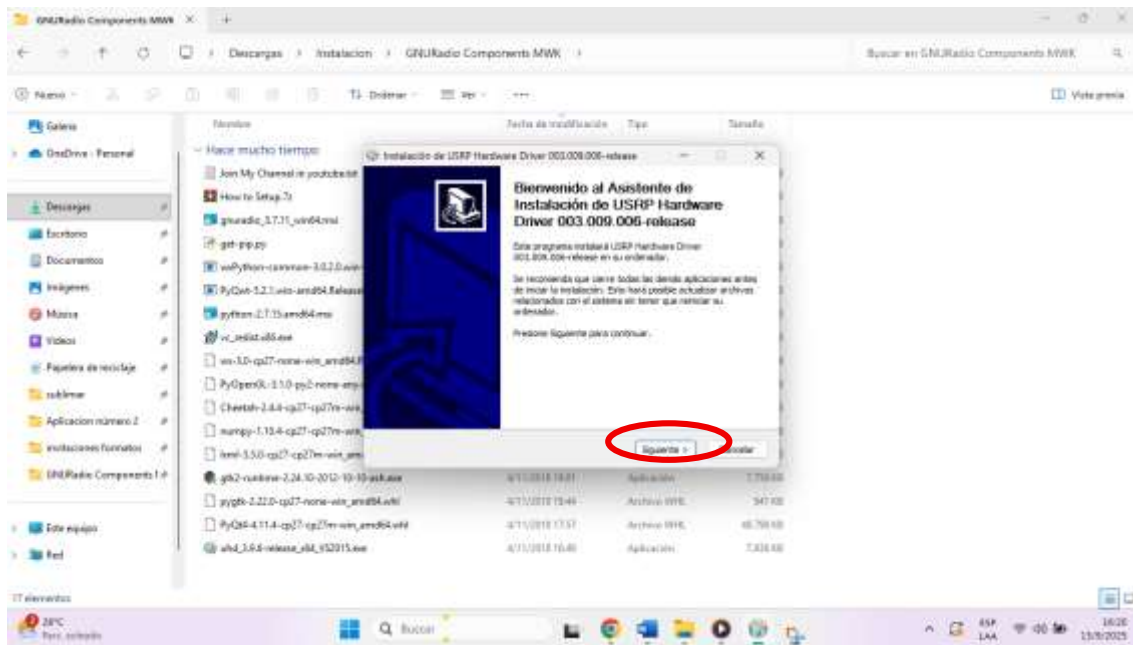
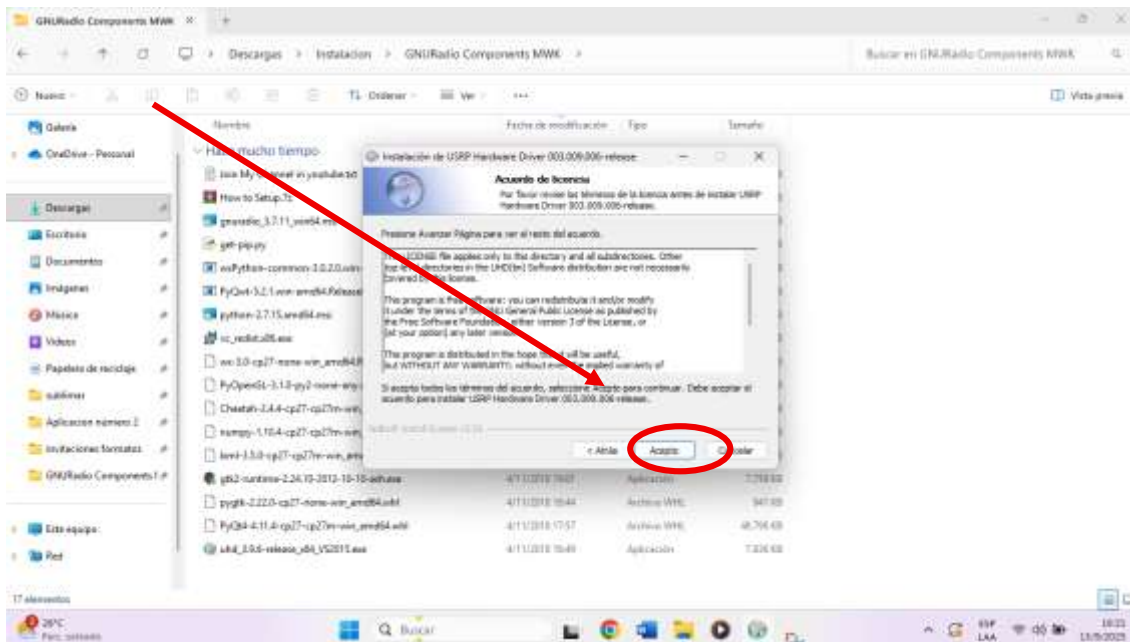


Figura A 20: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, primera ventana.



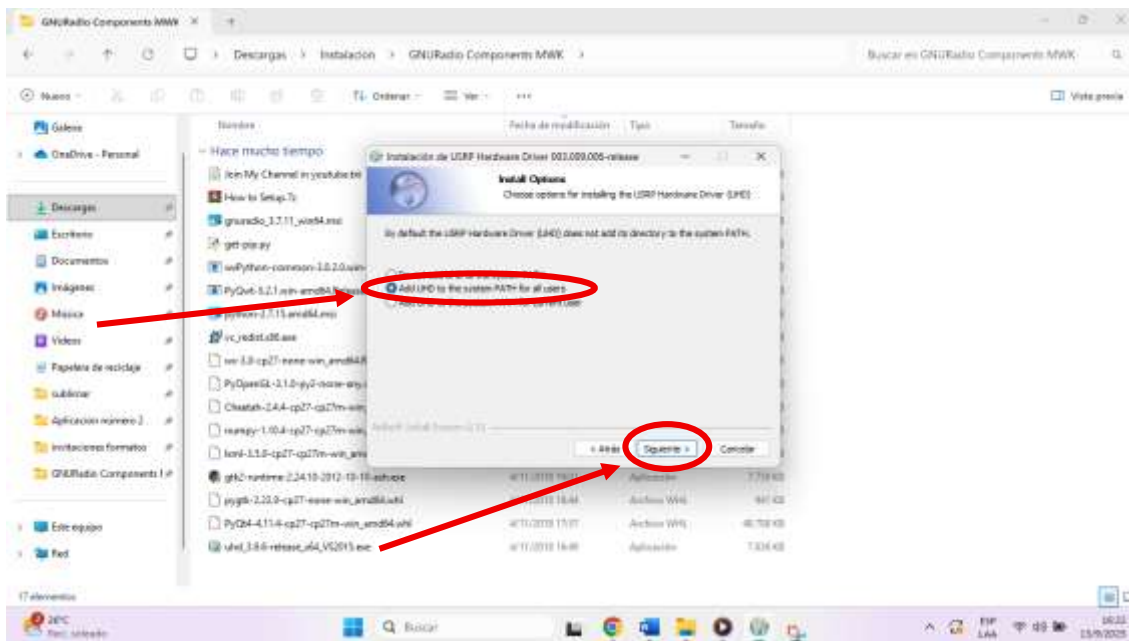
Luego se aceptan los acuerdos de licencia dando clic en el botón “Aceptar” el cual se muestra en la figura A 21.

Figura A 21: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, segunda ventana.



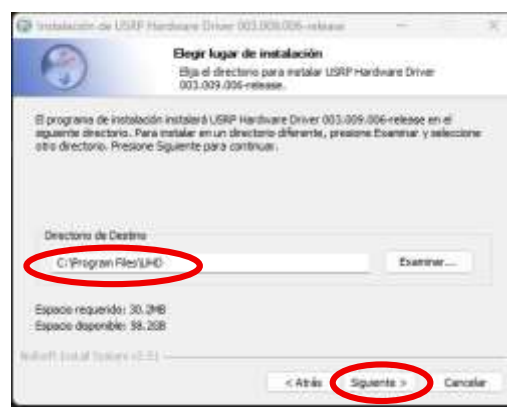
Después se debe elegir la carpeta para el SDR y hacer clic en siguiente como se muestra en la figura A 22, y en siguiente.

Figura A 22: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, tercera ventana



Posteriormente se debe crear la carpeta en la que se utilizará para el SDR y hacer clic en siguiente como se muestra en la figura A 23 y hacer clic en siguiente.

Figura A 23: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, cuarta ventana.



Posteriormente instalar como se muestran en las figuras A 24 y A 25, fundamentales para el uso del SDR con el software GNU Radio dando clic en siguiente.

Figura A 24: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, quinta ventana.

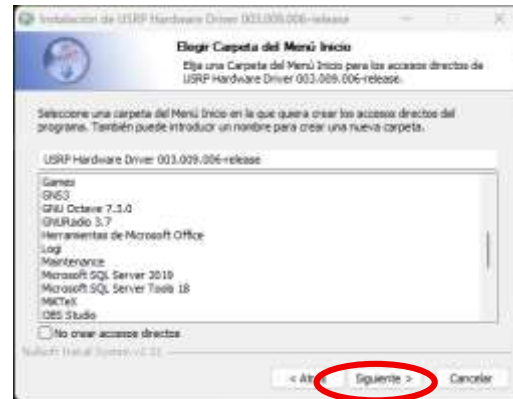
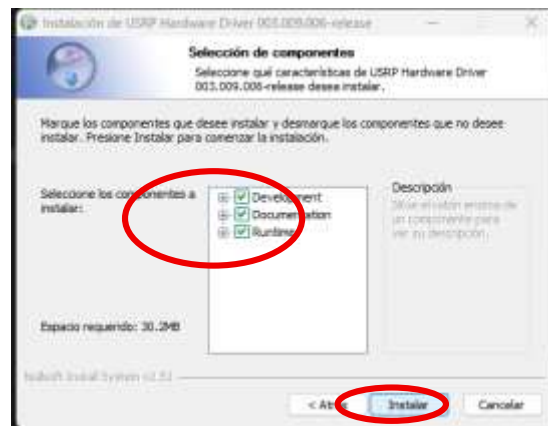


Figura A 25: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, sexta ventana.



Al seleccionar las 3 casillas que se observan en la figura A 25, hacer clic en instalar. Posteriormente iniciará la instalación de los drivers tal cual se observa en la figura A 26, los cuales servirán para la correcta operación del software junto con el SDR HackRF One.

Figura A 26: Instalador del software uhd_3.9.6-release_x64_VS2015, séptima ventana



Al finalizar la instalación aparecerá una ventana que indica que los drivers se han instalado con éxito y para culminar se le debe hacer clic en “Finalizar”.

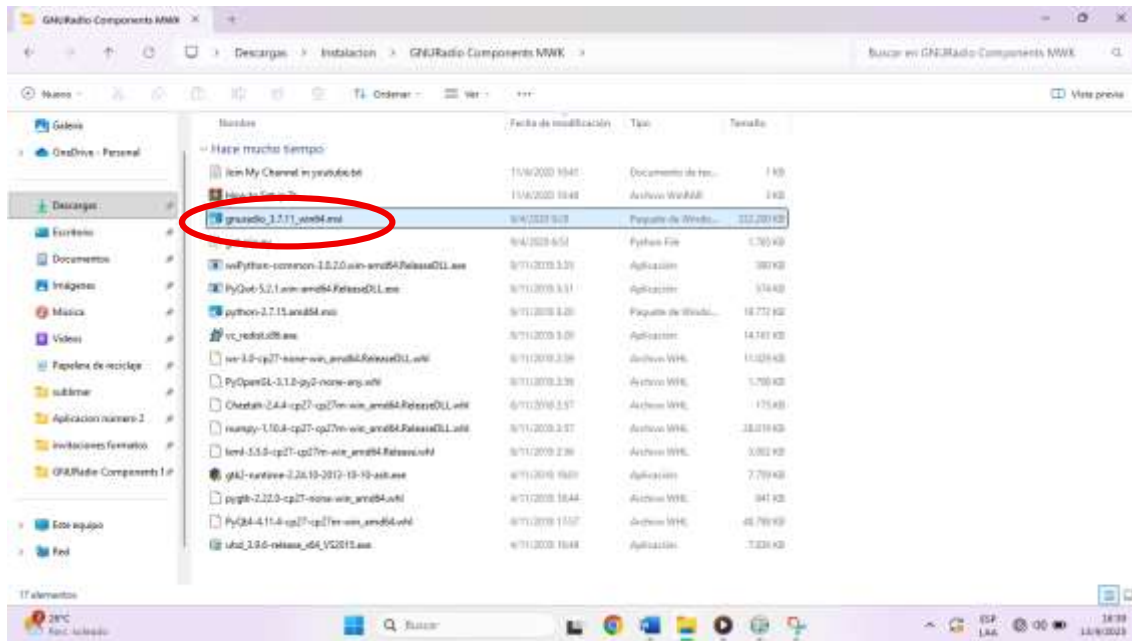
Figura A 27: Instalador del software uhd 3.9.6 (release_x64) VS2015, octava ventana.



A.5 Instalación de GNU Radio

Una vez culminados los preparativos se inicia con la instalación del software GNU Radio, lo primero es ubicarse en la carpeta en el que se encuentran los archivos a instalar, luego se selecciona el ejecutable “gnuradio_3.7.11_win64” como se muestra en la figura A 28 y se procede a hacer doble clic.

Figura A 28: Instalador del software *gnuradio_3.7.11_win64*



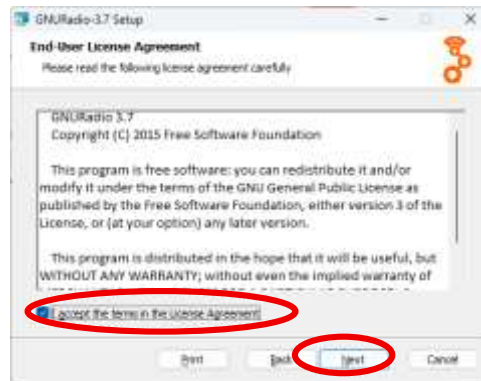
Aparece la primera ventana que se observa en la figura A 29, la cual da la bienvenida a la instalación del software y se procede a dar clic en “next”.

Figura A 29: Instalador del software *GNU Radio*, primera ventana.



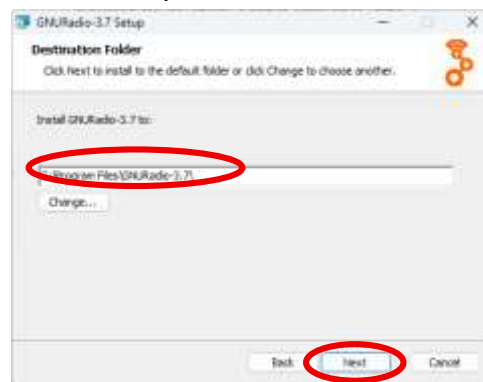
Luego aparecerá el acuerdo de licencia de usuario final, se seleccionará la casilla inferior izquierda donde se aceptan los términos y condiciones de la licencia y luego hacer clic en “Next” como se observa en la figura A 29.

Figura A30: Instalador del software GNU Radio, segunda ventana.



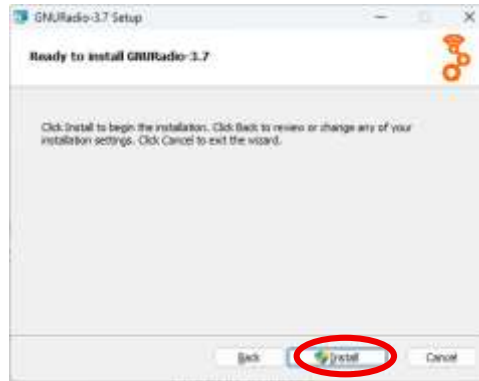
Luego aparecerá una ventana donde se indica la ubicación del software, que debe dejar la dirección por defecto y hacer clic en “Next”.

Figura A31: Instalador del software GNU Radio, tercera ventana.



Ya con lo anterior realizado, se está listo para iniciar la instalación, al aparecer la ventana siguiente donde indica lo mencionado anteriormente y se da clic en “Install”.

Figura A32: Instalador del software GNU Radio, cuarta ventana.



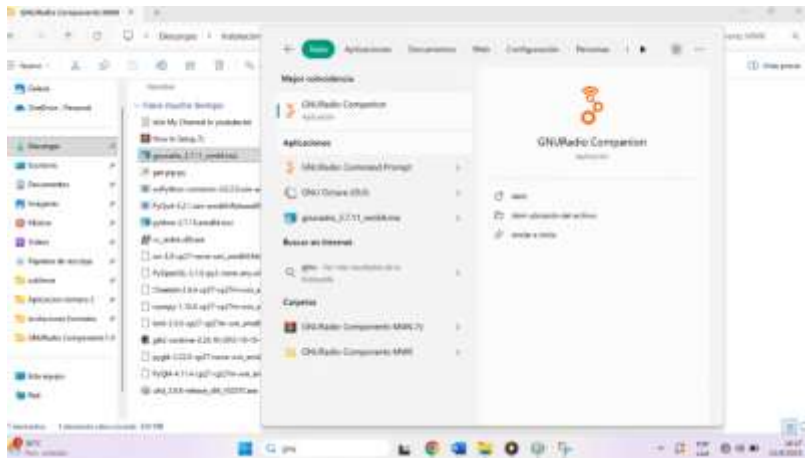
Esperar que finalice la instalación y luego hacer clic en “Next”. Posteriormente aparecerá la ventana que indica que la instalación del software ha finalizado y para culminar, hacer clic en “Finish”.

Figura A33: Instalador del software GNU Radio, quinta ventana.



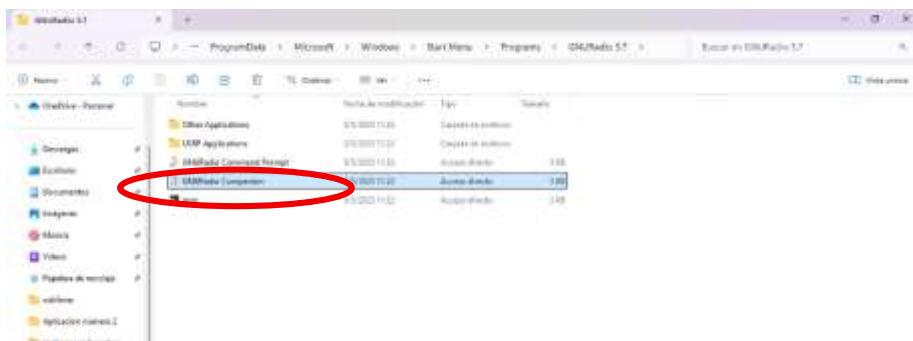
Una vez instalado el software, en el buscador del sistema operativo se escribe “GNURadio”, aparecerá el ejecutable y luego hacer clic en “Abrir ubicación del archivo”.

Figura A 34: Ejecutable del software GNU Radio 1.



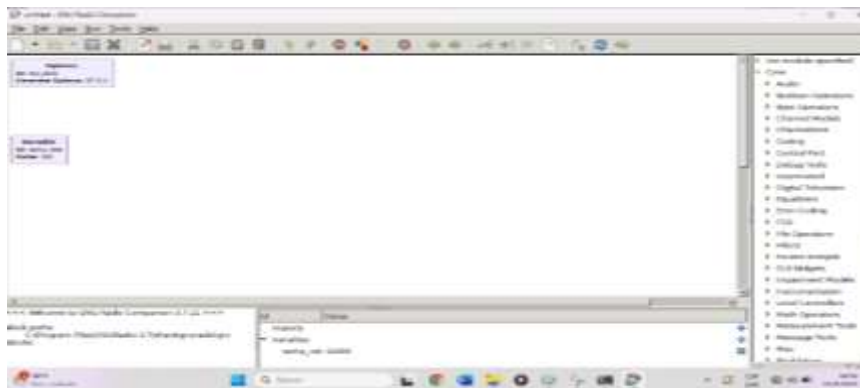
Para poder ejecutar el software se debe hacer doble clic en el ejecutable de nombre “GNU Radio Companion”.

Figura A 35: Ejecutable del software GNU Radio 2.

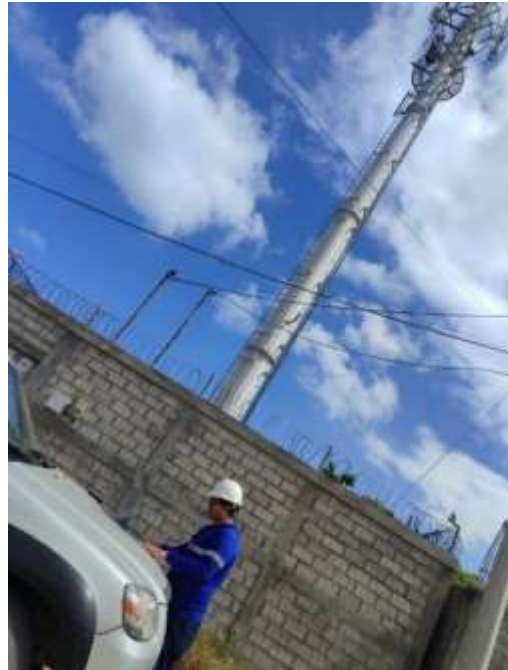


Luego se abrirá el software GNU Radio para programar con diagramas de bloques, listo para iniciar el programa.

Figura A 36: Interfaz del software GNU Radio.

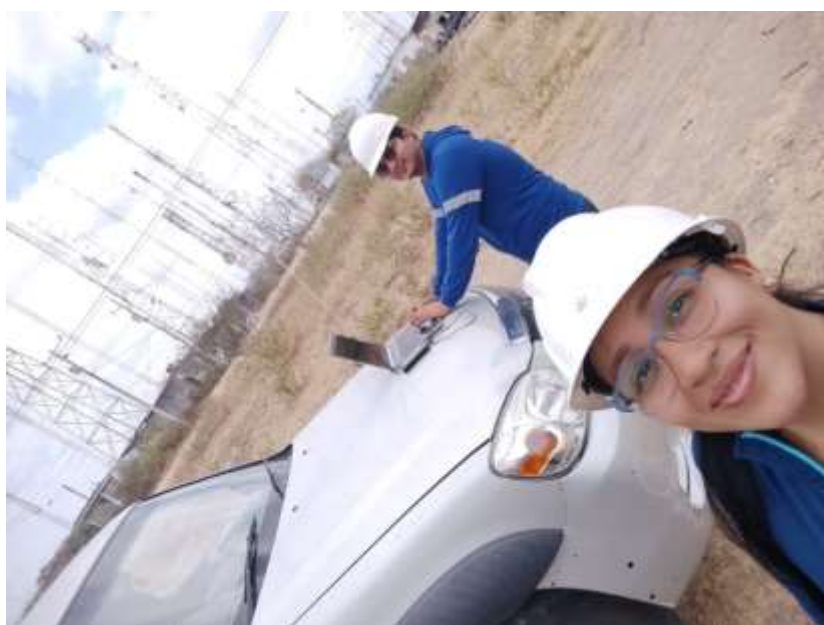


Anexo B: evidencia fotográfica de las mediciones



ANEXO B1: Zona costera – estimación con SDR en sitio

En el anexo B1, se muestran evidencias de los miembros estudiantes integrantes del trabajo de titulación realizando las mediciones con el dispositivo HackRF One en el eNodeB de la zona costera.



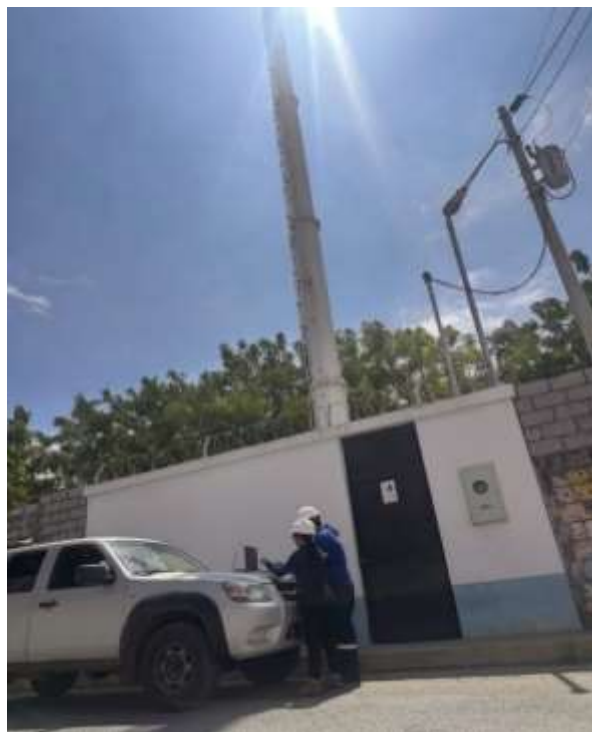
ANEXO B2: Zona montañosa – estimación con SDR en sitio

En el anexo B2, se muestran evidencias de los miembros estudiantes integrantes del trabajo de titulación realizando las mediciones con el dispositivo HackRF One en el eNodeB de la zona montañosa.



ANEXO B3: Zona rural – estimación con SDR en sitio

En el anexo B3, se muestran evidencias de los miembros estudiantes integrantes del trabajo de titulación realizando las mediciones con el dispositivo HackRF One en el eNodeB de la zona rural



ANEXO B4: Zona urbana – estimación con SDR en sitio

En el anexo B4, se muestran evidencias de los miembros estudiantes integrantes del trabajo de titulación realizando las mediciones con el dispositivo HackRF One en el eNodeB de la zona urbana.